



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

**L'INSTITUTE NATIONAL DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET
TECHNOLOGIQUE POR L'ENVIRONNEMENT ET L'AGRICULTURE**

TESIS

**Que para obtener el grado de
Doctor en Ciencias del Agua**

**P R E S E N T A:
RICARDO ARÉVALO MEJÍA**

**DESARROLLO DE HERRAMIENTA HIDRO-
INFORMÁTICA PARA ESTIMAR EL CAUDAL
ECOLÓGICO EN CUENCAS NO AFORADAS**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. CARLOS DÍAZ DELGADO**

**CO-DIRECTOR:
DR. ETIENNE LEBLOIS**

**CO-DIRECTOR
DR. CARLOS ALBERTO MASTACHI LOZA**

AGRADECIMIENTOS

La realización de la presente investigación no pudo haberse llevado a cabo sin el apoyo del pueblo de México a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a quienes agradezco por las facilidades económicas brindadas.

También agradezco al personal del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) ahora conocido como Instituto de Investigación y Tecnología en Ciencias del Agua (IITCA) por el apoyo y conocimiento que me fue brindado. Agradezco infinitamente al Dr. Carlos Díaz Delgado por dirigir el trabajo de investigación, así como por las observaciones y correcciones realizadas para mejorar la calidad de ésta. Al Dr. Carlos Alberto Mastachi Loza por co-dirigir la investigación y por todo el apoyo que me brindó tanto en el ámbito científico como personal. Al Dr. Humberto Salinas Tapia por compartir sus conocimientos de programación en el lenguaje técnico Matlab y por asesorarme a lo largo de la realización del trabajo. Al Dr. Khalidou M. Bâ por sus valiosos aportes en la investigación científica realizada.

Así mismo, extendiendo un agradecimiento al personal de *l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture* (Irstea) en Francia por la oportunidad que me brindaron de realizar una estancia doctoral en el centro Lyon-Villeurbanne. Especialmente agradezco al Dr. Etienne Leblois quien me recibió, dirigió y formó en el campo de la geoestadística durante el desarrollo de mi estancia en Francia, así como por las apasionadas discusiones científicas. Gracias amigo y colega. También agradezco al personal administrativo por su cálido apoyo: Marion Débaisieux y Ane-Laure Achard. Agradezco al personal científico del centro Lyon-Villeurbanne: Dra. Christine Paulard, Dra. Isabelle Braud, Dra. Claire Lauvernet, Dr. Pascal Breil y Dr. Nicolas Lamouroux por permitirme asistir a las discusiones de cada lunes.

El trabajo realizado también es producto del apoyo incondicional de mi familia a quien tanto amo. Esta investigación la dedico especialmente a mi madre Hilda Refugio Mejía Alcántara por motivarme a seguir una formación científica y alcanzar nuevos horizontes como profesionista. Agradezco a Erika, Alejandra, Rafael, Daniel, Alejandra pequeña y Yolanda por acompañarme durante mi formación.

Agradezco infinitamente a mis amigos en México por su apoyo: Juan Antonio, Nancy, Raymundo, Luis y Saula. Agradezco a mis amigos en Francia por su apoyo y apasionadas discusiones: Shen, Emmeline, Emilie, Bastien, Aurelien, Lilly-Rose, Alexandre, Meriem, Amel, Musaab, Cécile, Clovis, Jassine, Sophie y otros cuyos nombres olvidé pero que tengo presentes con mi corazón. Agradezco a mis amigos extranjeros: Lena, Holly, Emily, Monique, Beau y Yaihara.

RESUMEN

El caudal ecológico se define como la cantidad, calidad y variación del gasto reservado para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales (DOF, 2012). Sus beneficios han sido cuantificados por los países que lo han implementado en las políticas de regulación de caudal.

Hoy en día, las actividades del desarrollo económico, industrial y poblacional del ser humano han alterado los componentes de los regímenes de cauces. En México, la evaluación del estado de alteración hidrológica se llevó a cabo a través de la estimación de los Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS). En dicho procedimiento se analizaron los caudales habituales o medios, eventos extremos máximos y eventos extremos mínimos. Los resultados revelan que 232 cuencas hidrológicas se encuentran en estado de no alteración, cuyas series se asumieron presuntamente naturales. Por otro lado, se obtuvieron 505 cuencas hidrológicas en estado alterado en su régimen hidrológico. Sin embargo, 106 cuencas se encuentran completamente alteradas. Por tanto, el paradigma natural de caudales no es aplicable en este grupo de cuencas. Adicionalmente, se correlacionaron variables socioeconómicas con el estado de alteración. Este análisis demostró que la densidad de población, el producto interno bruto, el índice de desarrollo humano, la población económicamente activa y la disponibilidad natural per cápita están correlacionadas con el estado de alteración.

Por otro lado, se espacializó la información climática disponible en México de variables como: temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para ser utilizadas en análisis de cambio climático y análisis ecológico. Esto se logró a través de métodos geoestadísticos de interpolación. Se verificó que las estaciones climáticas de México presentan una estructura que puede ser ajustada a variogramas teóricos. Fenómenos naturales como El Niño Oscilación Sur (ENOS) no modifica la estructura del variograma sino la varianza de éste. Para el caso de las temperaturas, su magnitud fue espacializada a través del método Kriging con factor de cambio externo (KED Kriging, por sus siglas en inglés). El caso de la precipitación fue diferente, ya que este fenómeno presenta intermitencia espacial y temporal. Por ello, se empleó el método geoestadístico de simulación condicional para crear campos convectivos de precipitación.

Con las imágenes climáticas espacializadas, se analizaron los efectos del cambio climático en México a través de los Índices de Cambio Climático (ICC) propuestos por el Equipo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se analizó la serie cronológica con la pendiente Theil-Sen para la detección de tendencias. Su significancia fue analizada por el método Mann-Kendall. Los resultados mostraron que el cambio climático está presente en toda la república mexicana. En cuanto a la magnitud de la temperatura máxima, los estados del norte de México mostraron tendencias de incremento. Mientras tanto, el sur y sureste de México mostraron tendencias significativas de

incremento en la temperatura mínima. En cuanto a la precipitación, se ha modificado su intensidad y distribución en el país.

El trabajo buscó correlacionar la información climática con información ecológica de especies. Por ello, se retomaron las bases de datos de distribución potencial de especies de mamíferos, anfibios y reptiles para estimar su diversidad alfa (D_α) puestas a disposición por la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés). La D_α fue correlacionada con la variación geográfica y climática de México. De esta forma, fue posible identificar diferentes familias de especies en función de la temperatura media anual y la precipitación media anual. Estos grupos de familias fueron correlacionados con los ICC y fue posible identificar familias de mamíferos, anfibios y reptiles vulnerables al cambio climático.

Con la información de regulación de presas, estado de alteración hidrológica, variables climáticas espacializadas, estado de variación por cambio climático, y la D_α de los grupos analizados, se realizaron dos regionalizaciones de cuencas hidrográficas. Dichas regionalizaciones se realizaron a través del método jerárquico de clasificación K-medoids. La primera de ellas corresponde al grupo de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico. Estas cuencas fueron clasificadas en cuatro regiones con características homogéneas. La segunda regionalización se llevó a cabo en el grupo de cuencas alteradas en su régimen hidrológico. Estas cuencas fueron clasificadas en cinco regiones homogéneas.

Con los grupos de cuencas regionalizados, se aplicó un método de clasificación regional de caudal para hacer posible la estimación de series de caudales, tanto no alterados como alterados en su régimen hidrológico, en sitios no aforados. Los resultados mostraron una buena eficiencia para ambos grupos de cuencas. De esta forma, se aceptó la hipótesis de la investigación: Es posible estimar el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas no aforadas, o que no cuenten con un periodo de registro mínimo de 20 años, y sistematizar dicho proceso. Lo anterior, por medio de una regionalización de cuencas y estimación de caudales naturales a través de métodos de clasificación regional.

ABSTRACT

The environmental flow is defined as the quantity, quality and variation of water reserved to preserve environmental services, components, functions, processes and the resilience of aquatic and terrestrial ecosystems that depend on hydrological, geomorphological, ecological and social processes (DOF, 2012). Its benefits have been quantified by the countries that have implemented it in the flow regulation policies.

Nowadays, the economic and industrial activities along with population development of the human being have altered the components of the river systems. In Mexico, the assessment of hydrological alteration status was carried out through the estimation of the Hydrological Alteration Indices in Rivers (IAHRIS). In this procedure, the usual or average flow rates, maximum extreme events and minimum extreme events were analyzed. The results reveal that 232 hydrological basins are in a status of no alteration, whose series were assumed to be natural. On the other hand, 505 hydrological basins were obtained in an altered status in their hydrological regime. However, 106 basins are completely altered. Therefore, the natural flow paradigm is not applicable in this group of basins any longer. Additionally, correlation between socioeconomic variables and the state of alteration was searched. This analysis showed that population density, gross domestic product, human development index, economically active population and natural availability per capita are correlated with the state of alteration.

On the other hand, climate information in Mexico such as: ambient temperature, maximum temperature, minimum temperature and precipitation; was spatialized to be used in climate change analysis and ecological analysis. This was achieved through geostatistical interpolation methods. It was verified that the climatic stations of Mexico have a structure that can be adjusted to theoretical variograms. Natural phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) does not modify the structure of the variogram but its variance. In the present research, the magnitude of any temperature variable was spatialized through the method Kriging with external drift (KED Kriging). The case of precipitation was different, since this phenomenon has spatial and temporal intermittence. For this reason, the geostationary method of conditional simulation was used to create convective precipitation fields.

With the spatialized climate images, the effects of climate change in Mexico were analyzed through the Climate Change Indexes (CCI) proposed by the Expert Team on Climate Change Detection and Indexes (ETCCDI). Subsequently, chronological series were analyzed with Theil-Sen slope for trend detection. Its significance was evaluated by the Mann-Kendall test. The results showed that climate change is present throughout the Mexican Republic. Regarding the magnitude of the maximum temperature, the northern states of Mexico showed increasing trends. Meanwhile, southern and southeastern Mexico showed significant trends of increase in minimum temperature. In terms of precipitation, its intensity and distribution in the country have been modified.

The present work sought to correlate climate information with ecological species distribution. Therefore, the data bases of the International Union for Conservation of Nature (IUCN) related to potential distribution of mammal, amphibian and reptile species were used to estimate their alpha diversity ($D\alpha$). The $D\alpha$ was correlated with the geographic and climatic variation of Mexico. In this way, it was possible to identify different families of species according to the average annual temperature and the average annual rainfall. These groups of families were correlated with the CCI and it was possible to identify families of mammals, amphibians and reptiles vulnerable to climate change.

With the information on dam regulation, state of hydrological alteration, spatialized climatic variables, state of variation due to climate change, and the $D\alpha$ of the analyzed groups, two river basin regionalizations were carried out. These regionalizations were performed through the hierarchical K-medoids classification method. The first of them corresponds to the group of non-altered basins in their hydrological regime. These basins were classified into four regions with homogeneous characteristics. The second regionalization was carried out in the group of altered basins in their hydrological regime. These basins were classified into five homogeneous regions.

With the groups of regionalized basins, a method of regional classification of flow was applied to make possible the estimation of flow series, both non-altered and altered in their hydrological regime, in non-gauged sites. The results showed good efficiency for both groups of basins. In this way, the research hypothesis was accepted: It is possible to estimate the environmental flow in non-gauged sites, or those that do not have a minimum record period of 20 years and systematize this process. This is feasible by a basin regionalization and estimation of natural flows through regional classification methods.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	5
ABSTRACT.....	7
ÍNDICE	9
LISTA DE TABLAS.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	23
1.1. Justificación.....	24
1.2. Hipótesis.....	25
1.3. Objetivo general	25
1.4. Objetivos específicos.....	26
2. CAPÍTULO 2 MÉTODO.....	27
2.1. Introducción	27
2.2. Alteración hidrológica en ríos y cuerpos de agua	27
2.3. Cambio climático	28
2.4. Análisis ecológico	28
2.5. Regionalización de cuencas hidrológicas	29
2.6. Estimación de series de caudales naturales y alterados.....	29
2.7. Sistematización del método adoptado.....	30
3. CAPÍTULO 3 CAUDAL ECOLÓGICO.....	35
3.1. Introducción	35
3.2. Evolución de los principios científicos del caudal ecológico.....	36
3.3. Paradigma del régimen natural de caudales.....	40
3.4. Principales métodos para estimar el caudal ecológico	42
3.4.1. Métodos hidrológicos	43
3.4.2. Métodos hidráulicos	43
3.4.3. Métodos de simulación de hábitat.....	44
3.4.4. Métodos holísticos.....	44
3.5. Selección del método.....	47
4. CAPÍTULO 4 ALTERACIÓN HIDROLÓGICA	49
4.1. Introducción	49
4.2. Métodos para cuantificar la alteración hidrológica	51

4.2.1.	IAH de la NMX-AA-159-SCFI-2012	51
4.2.2.	IAH de IAHRIS	52
4.3.	Evaluación de la alteración hidrológica en México.	65
4.3.1.	Materiales y métodos	66
4.3.2.	Resultados del análisis de alteración hidrológica	74
4.4.	Conclusiones y recomendaciones	93
5.	CAPÍTULO 5 ESPACIALIZACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS.....	95
5.1.	Introducción	95
5.2.	Métodos de interpolación estocásticos.....	96
5.2.1.	Distancia inversa ponderada	96
5.2.2.	Funciones polinomiales (<i>Splines</i>)	97
5.2.3.	Regresiones lineales	97
5.2.4.	Kriging	97
5.2.6.	Simulación geoestadística.....	110
5.2.7.	Validación de las interpolaciones	119
5.3.	Interpolación de variables climáticas en México.	120
5.3.1.	Datos climáticos disponibles.....	120
5.3.2.	Análisis variográfico.....	126
5.3.3.	Interpolación de temperatura	129
5.3.4.	Interpolación de precipitación.....	148
5.4.	Conclusiones y recomendaciones	156
6.	CAPÍTULO 6 CAMBIO CLIMÁTICO	159
6.1.	Introducción	159
6.1.1.	Aporte humano a efectos del cambio climático.	160
6.1.2.	Efectos del cambio climático en la dinámica global del clima.....	161
6.1.3.	Efectos del cambio climático en ríos y cuerpos de agua	163
6.1.4.	Efectos del cambio climático en especies	166
6.1.5.	Adaptación al cambio climático.....	171
6.2.	Métodos estadísticos no paramétricos para evaluar el cambio climático	172
6.2.1.	Índices de cambio climático del ETCCDI.....	172
6.2.2.	Detección de tendencias climáticas.....	178
6.3.	Evaluación del cambio climático en México	180
6.3.1.	Materiales y método	181
6.3.2.	Resultados	181

6.4.	Conclusiones y recomendaciones	235
7.	CAPÍTULO 7 ANÁLISIS ECOLÓGICO	239
7.1.	Introducción	239
7.2.	Métodos estadísticos de análisis caudal-respuesta biológica	240
7.2.1.	Modelos lineales	240
7.2.2.	Modelos lineales y no lineales generalizados	241
7.2.3.	Modelos jerárquicos	241
7.2.4.	Modelos de <i>Machine Learning</i>	242
7.2.5.	Redes Bayesianas	244
7.2.6.	Diversidad de especies.....	245
7.3.	Análisis de diversidad alfa en México	249
7.3.1.	Materiales y método	250
7.3.2.	Resultados	250
7.4.	Conclusiones y recomendaciones	271
8.	CAPÍTULO 8 REGIONALIZACIÓN.....	273
8.1.	Introducción	273
8.2.	Métodos de análisis de conglomerados (<i>cluster analysis</i>)	274
8.2.1.	Métodos de aglomeración.....	275
8.2.2.	Métodos de partición.	276
8.2.3.	Validación del número de conglomerados.....	278
8.3.	Problema de sobre ajuste	279
8.4.	Valores medios por cuenca hidrográfica.....	280
8.5.	Regionalización de cuencas en México	281
8.5.1.	Materiales y métodos.....	281
8.5.2.	Resultados	282
8.6.	Conclusiones	319
9.	CAPÍTULO 9 CAUDAL ECOLÓGICO EN MÉXICO	321
9.1.	Introducción	321
9.2.	Métodos para estimar el caudal ecológico en sitios no aforados.....	322
9.2.1.	Métodos geoestadísticos	322
9.2.2.	Métodos de clasificación regional	326
9.3.	Estimación de caudal ecológico en México	329
9.3.1.	Materiales	329
9.3.2.	Resultados	331

9.4. Conclusiones	334
10. CAPÍTULO 10 HYDRA-Eflow	335
10.1. Introducción.....	335
11. CAPÍTULO 11 CONCLUSIONES	337
Alteración hidrológica	337
Espacialización de información climática	338
Cambio climático	339
Análisis ecológico	340
Regionalización de cuencas hidrológicas	340
Hydra-Eflow.....	341
Conclusión general.....	341
12. CAPÍTULO 12 PERSPECTIVAS.....	343
Alteración hidrológica	343
Espacialización de información climática	343
Cambio climático	344
Análisis ecológico	344
Regionalización.....	344
Estimación de caudal ecológico en sitios no aforados	344
Hydra-Eflow.....	345
Retribución social.....	345
13. NOMENCLATURA	347
REFERENCIAS	353

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen del método de investigación.....	31
Tabla 3.1 Ejemplos de las hipótesis que describen las respuestas ecológicas ante la alteración hidrológica (Poff et al., 2010).	41
Tabla 3.2 Resumen de las características generales de métodos para estimar el caudal ecológico. Fuente: adaptada de DOF (2012) y Poff et al. (2017).....	46
Tabla 4.1 Parámetros que conforman los IAHRIS.	53
Tabla 4.2 Clasificación de los estatus hidrológicos para los índices parciales (IAH _i). Fuente: Martínez y Fernández (2006).	56
Tabla 4.3 Clasificación de los estatus hidrológicos para los índices globales (IAH _g). Fuente: Martínez y Fernández (2006).	56
Tabla 4.4 Información contenida en las bases de datos de BANDAS.	66
Tabla 4.5 Estructura de las bases de datos BANDAS ordenada.	68
Tabla 4.6 Parámetros hidrológicos requeridos por los índices de IAHRIS.	73
Tabla 4.7 Valores medios obtenidos por IAH parcial para cada región hidrológica (RH) con resultados.	86
Tabla 4.8 Variables hidrológicas de subcuencas urbanas para México. Fuente: adaptada de Cervantes-Jiménez (2015).....	87
Tabla 5.1 Modelos de variogramas paramétricos. Fuente: adaptada de Lichtenstern (2013).....	102
Tabla 5.2 Características principales de los métodos de simulación condicional. Fuente: Chilès y Delfiner (2012).....	113
Tabla 5.3 Expresiones para medir las variaciones entre datos observados y estimados.....	119
Tabla 5.4 Información contenida en las bases de datos a escala diaria de CLICOM.	120
Tabla 5.5 Estructura de la base de datos CLICOM ordenada.	121
Tabla 5.6 Disponibilidad de estaciones CLICOM al año 2016.....	122
Tabla 5.7 Valores medios de los errores de interpolación para T (°C), T _{mín} (°C) y T _{máx} (°C).	148
Tabla 5.8 Parámetros de variogramas ajustados para el indicador de precipitación nula y para el campo de precipitación no nula.	149
Tabla 5.9 Número de estaciones, periodo y estadísticas de error de dos bases climáticas espacializadas para México.	157
Tabla 6.1 Conjunto de imágenes empleadas para estimar los ICC del ETCCDI.	182
Tabla 6.2 Agrupación de ICCs por variable climática que evalúan.	224
Tabla 7.1 Ajustes a las variables geográficas y climáticas de anfibios, mamíferos y reptiles.	266
Tabla 8.1 Distancias comúnmente utilizadas en análisis de conglomerados. Fuente: adaptada de Berzal (2018).	275
Tabla 8.2 Resumen de estadísticas para la Región 1 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	286
Tabla 8.3 Resumen de estadísticas para la Región 2 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	287
Tabla 8.4 Resumen de estadísticas para la Región 3 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	288

Tabla 8.5 Resumen de estadísticas para la Región 4 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	289
Tabla 8.6 Matriz de correlación entre las variables seleccionadas para la regionalización de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	290
Tabla 8.7 Resumen de estadísticas para la Región 1 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	299
Tabla 8.8 Resumen de estadísticas para la Región 2 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	302
Tabla 8.9 Resumen de estadísticas para la Región 3 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	305
Tabla 8.10 Resumen de estadísticas para la Región 4 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	308
Tabla 8.11 Resumen de estadísticas para la Región 5 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	311
Tabla 9.1 Descriptores físicos empleados para las CDC regionales.	331
Tabla 9.2 Descriptores de cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico seleccionados durante la regresión <i>stepwise</i>	332
Tabla 9.3 Estadísticas de los parámetros de las CDC ajustadas a los percentiles regionalizados.	333
Tabla 9.4 Índices de Nash promedio para cada región de cuencas hidrológicas.	333

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Secuencia y dependencia de los capítulos de la presente investigación.....	33
Figura 3.1 Paradigma del régimen natural de caudales (adaptado de: Bunn y Arthington, 2002).	41
Figura 3.2 Método ELOHA propuesta por Poff et al. (2010).	45
Figura 4.1 Esquema ilustrativo de selección del sitio de estudio dentro de la cuenca (Fuente: adaptado de DOF, 2012).	52
Figura 4.2 Clasificación de estatus hidrológicos. Fuente: adaptada de CIS-WFD (2003).	55
Figura 4.3 Rango de variabilidad de eventos extremos.	57
Figura 4.4 Evaluación del índice de variabilidad o de diferencias extremas de un año determinado. A= Aportación mensual máxima-Aportación mensual mínima en régimen alterado. B=Aportación mensual Máxima-Aportación mensual mínima en régimen natural. Fuente: adaptado de Martínez y Fernández (2006).	59
Figura 4.5 Representación gráfica del significado de estacionalidad o desfase temporal para valores máximos y mínimos. Fuente: adaptado de Martínez y Fernández (2006).....	59
Figura 4.6 Mapa de la afectación potencial a la condición ecológica de los sistemas fluviales a nivel de cuenca (Fuente: Garrido et al., 2010).....	66
Figura 4.7 Mapa de regiones hidrológicas de México.	67
Figura 4.8 Disponibilidad de datos hidrométricos en México (estaciones BANDAS).	69
Figura 4.9 Mapa de la distribución espacial de obras de regulación y cuencas hidrográficas. Fuente: adaptada de Arévalo-Mejía (2015).	70
Figura 4.10 Mapa de relación de cuencas reguladas y no reguladas. Fuente: adaptada de Arévalo-Mejía (2015).....	71
Figura 4.11 Detalle de la Figura 4.10.	72
Figura 4.12 Relación del número de cuencas alteradas y no alteradas por región hidrológica.	74
Figura 4.13 Mapa de cuencas no alteradas.	77
Figura 4.14 Mapa de cuencas alteradas.	78
Figura 4.15 Mapa de cuencas inconclusas.	79
Figura 4.16 Mapa de cuencas alteradas en valores habituales.	80
Figura 4.17 Mapa de cuencas alteradas en valores extremos máximos.	81
Figura 4.18 Mapa de cuencas alteradas en valores extremos mínimos.	82
Figura 4.19 Mapa de cuencas completamente alteradas.	83
Figura 4.20 Mapa de cuencas rehabilitables en el corto plazo.	84
Figura 4.21 Boxplot de índices de alteración global por región hidrológica.	88
Figura 4.22 Mapas de densidad de población por municipio (hab/km ²) e índice de desarrollo humano (tasa). Fuente: adaptada de Cervantes-Jiménez (2015).....	89
Figura 4.23 Mapas de disponibilidad natural media per cápita (m ³ /año) y producto interno bruto total (\$/km ²). Fuente: adaptada de Cervantes-Jiménez (2015).	90
Figura 4.24 Mapa de población económicamente activa (hab). Fuente: adaptada de Cervantes-Jiménez (2015).....	91
Figura 4.25 Variación de valores socio-económicas según el grupo de cuencas (Alt – alteradas y Nat – No alteradas): a) densidad de población; b) IDH; c) disponibilidad natural; d) PIB total y e) PEA. ...	92
Figura 5.1 Relación gráfica entre variograma y covarianza.....	99

Figura 5.2 Proceso de análisis variográfico: a) nube de variograma, b) variograma experimental, c) variograma teórico.	101
Figura 5.3 Ilustración del problema de Alfaro (1979): a) muestreo de la profundidad del lecho marino a cada 100 m; b) estimación del lecho marino por Kriging; c) perfil real y d) simulación condicional basada en los muestreos a cada 100 m (Fuente: Chilès & Delfiner, 2012).	111
Figura 5.4 Ejemplos de CAs: a) espectral básico; b) dilusión por función isotrópica; c) dilusión por discos aleatorios; d) Gaussiano; e) mosaico con partición por polígonos de Poisson; f) Gaussiano truncado; g) mosaico por conjuntos aleatorios; h) indicador secuencial e i) poliedros de Poisson. ..	114
Figura 5.5 Principio de bandas turnantes en 2D. Fuente: Chilès y Delfiner (2012).	115
Figura 5.6 a) Tres bandas turnantes en un espacio 3D con un punto P_n proyectado en las bandas; b) simulación libre en la primer banda (S_1); c) simulación libre en la segunda banda (S_2) y d) campo gaussiano final.	116
Figura 5.7 a) Ajuste gaussiano de la fracción de precipitación nula (q_0); b) imagen binaria de intermitencia de lluvia.	117
Figura 5.8 Interpolación de la precipitación no nula por Kriging ordinario.	117
Figura 5.9 Simulación final de campo de lluvia intermitente.	118
Figura 5.10 Diagrama general para generar campos advectivos homogéneos de precipitación intermitente $Z(x)$ en SAMPO por medio de un indicador booleano $I_s(x)$ que muestra la intermitencia y un campo gaussiano de precipitación no nula $C_s(x)$	118
Figura 5.11 Disponibilidad de datos de temperatura en México (estaciones CLICOM).	122
Figura 5.12 Disponibilidad de datos de temperatura máxima en México (estaciones CLICOM)	123
Figura 5.13 Disponibilidad de datos de temperatura mínima para México (estaciones CLICOM)...	123
Figura 5.14 Disponibilidad de datos de precipitación en México (estaciones CLICOM).	124
Figura 5.15 Disponibilidad de datos de evaporación en México (estaciones CLICOM).	124
Figura 5.16 Relación de estaciones CLICOM con calidad estadística seleccionadas.	125
Figura 5.17 Variogramas experimentales mensuales para a) precipitación y b) evaporación.	126
Figura 5.18 Variogramas experimentales mensuales para a) temperatura ambiente b) temperatura máxima y c) temperatura mínima.	127
Figura 5.19 Condiciones de temperatura y corrientes de viento del océano Pacífico durante a) período típico y b) en presencia del fenómeno ENOS. Fuente: adaptado de Magaña et al. (1997).	128
Figura 5.20 Variogramas experimentales del mes de enero para el periodo 1980-2012.	129
Figura 5.21 Resultados del análisis de factores de cambio externo de enero a junio: longitud, latitud, altitud y regresión multivariable (de izquierda a derecha).	131
Figura 5.22 Resultados del análisis de factores de cambio externo de julio a diciembre: longitud, latitud, altitud y regresión multivariable (de izquierda a derecha).	132
Figura 5.23 Barrido de Ventana móvil para interpolación (Kriging con vecino).	133
Figura 5.24 Variogramas regionales empleados para la interpolación de temperatura ambiente de enero a junio de 1980 con rango en m.	134
Figura 5.25 Variogramas regionales empleados para la interpolación de temperatura ambiente de julio a diciembre de 1980 con rango en m.	135
Figura 5.26 Temperatura estimada para el mes de Enero de 1980 y su varianza.	136
Figura 5.27 Temperatura estimada para el mes de Febrero de 1980 y su varianza.	137
Figura 5.28 Temperatura estimada para el mes de Marzo de 1980 y su varianza.	138

Figura 5.29 Temperatura estimada para el mes de Abril de 1980 y su varianza.	139
Figura 5.30 Temperatura estimada para el mes de Mayo de 1980 y su varianza.	140
Figura 5.31 Temperatura estimada para el mes de Junio de 1980 y su varianza.	141
Figura 5.32 Temperatura estimada para el mes de Julio de 1980 y su varianza.	142
Figura 5.33 Temperatura estimada para el mes de Agosto de 1980 y su varianza.	143
Figura 5.34 Temperatura estimada para el mes de Septiembre de 1980 y su varianza.	144
Figura 5.35 Temperatura estimada para el mes de Octubre de 1980 y su varianza.	145
Figura 5.36 Temperatura estimada para el mes de Noviembre de 1980 y su varianza.	146
Figura 5.37 Temperatura estimada para el mes de Diciembre de 1980 y su varianza.	147
Figura 5.38 Interfaz de la herramienta informática geoestadística SAMPO.	149
Figura 5.39 Mapas de precipitación media mensual para enero y febrero de 1980.	150
Figura 5.40 Mapas de precipitación media mensual para marzo y abril de 1980.	151
Figura 5.41 Mapas de precipitación media mensual para mayo y junio de 1980.	152
Figura 5.42 Mapas de precipitación media mensual para julio y agosto de 1980.	153
Figura 5.43 Mapas de precipitación media mensual para septiembre y octubre de 1980.	154
Figura 5.44 Mapas de precipitación media mensual para noviembre y diciembre de 1980.	155
Figura 6.1 Distribución de la energía solar que alcanza la atmósfera terrestre: radiación solar que alcanza la atmósfera (100 unidades), de las cuales, 30 unidades son reflejadas al espacio, 19 unidades son absorbidas por las nubes y 51 unidades alcanzan la superficie terrestre. De las 51 unidades, se emplean 23 unidades de radiación para la evaporación y 7 unidades para calentar el aire circundante a la tropósfera. La radiación emitida por la superficie terrestre es equivalente a 117 unidades, de las cuales, sólo 6 unidades son dispersadas al espacio y 111 quedan en la atmósfera para crear el efecto invernadero. De las 111 unidades atrapadas por la atmósfera, 96 regresan a la superficie terrestre. Fuente: Smith y Smith, 2007.	160
Figura 6.2 Variaciones de temperaturas anuales combinadas del aire de la superficie de la Tierra y de la superficie del océano (1961-2000). Fuente: IPCC (2001).	161
Figura 6.3 a) dinámica normal del movimiento de masas de aire en la Tierra y b) cambios en el ciclo calentamiento-enfriamiento de las masas de aire. Fuente: adaptado de Smith y Smith (2007).	162
Figura 6.4 Comparación de patrones pronosticados: a) temperatura global promedio y b) cambio en las precipitaciones globales. Los cambios con comparados con el valor promedio del periodo 1961-1990. Fuente: IPCC (2001).	163
Figura 6.5 Perfil de temperatura con profundidad de agua de una masa de agua abierta como un lago o una laguna. Fuente: Smith y Smith (2007).	165
Figura 6.6 Interacción de aguas subterráneas y superficiales: a) efluente; b) influente conectado y c) influente desconectado. Fuente: Tarbuck y Ludgens (2012).	166
Figura 6.7 Difusión de dióxido de carbono en las hojas a través de los estomas. Fuente: adaptada de Smith y Smith (2007).	167
Figura 6.8 Resultados observados en el crecimiento de diferentes tipos de plantas expuestas a altas concentraciones de CO ₂ : a) distribución de la proporción del aumento de la biomasa (PAB) y b) evolución del PAB debido a las altas concentraciones de CO ₂ . Fuente: adaptada de Poorter y Pérez-Soba (2002).	168
Figura 6.9 Abundancia (biomasa t/ha) de tres especies de árboles comunes en Europa relacionada con la temperatura media anual (°C) y la precipitación total anual (mm/año).	168

Figura 6.10 Rango de tolerancia de una población de peces ante la variación de la temperatura. Fuente: adaptada de Tyler y Spoolman (2015).	169
Figura 6.11 Cambios en los grupos consumidores a lo largo del corredor fluvial. La escala de la izquierda muestra el orden del arroyo y el ancho de este (m). Donde CPOM y FPOM son materia orgánica de partícula gruesa y fina respectivamente. Fuente: Smith y Smith (2007).	170
Figura 6.12 Cambios implícitos en los tamaños de poblaciones de depredadores y presas a lo largo del tiempo. Fuente: Smith y Smith (2007).	171
Figura 6.13 Perfil del río Bear en Nueva York, USA y gráfico de temperaturas en su cauce. Fuente: Smith y Smith (2007).	171
Figura 6.14 Ejemplo de serie espacio-temporal por píxel.	181
Figura 6.15 Número de días fríos (F0) para los años 1980 y 2012.	184
Figura 6.16 Número de días tropicales (TR20) para los años 1980 y 2012.	185
Figura 6.17 Tendencias Theil-Sen para no. de días fríos (F0) y tropicales (TR20) periodo 1980-2012.	186
Figura 6.18 Temperatura máxima cálida (TNX) para los años 1980 y 2012.	187
Figura 6.19 Temperatura mínima anual (TNN) para los años 1980 y 2012.	188
Figura 6.20 Tendencias Theil-Sen para Tmín cálida (TNX) y Tmín anual (TNN) periodo 1980-2012.	189
Figura 6.21 Porcentaje de días con frío extremo (TN10p) para los años 1980 y 2012.	190
Figura 6.22 Porcentaje de días con Tmín cálida (TN90p) para los años 1980 y 2012.	191
Figura 6.23 Tendencias Theil-Sen para días con frío extremo (TN10p) y Tmín cálida (TN90p) periodo 1980-2012.	192
Figura 6.24 Duración de la onda de frío (CSDI) para los años 1980 y 2012.	193
Figura 6.25 Duración de la onda de calor (WSDI) para los años 1980 y 2012.	194
Figura 6.26 Tendencias Theil-Sen para duración de onda de frío (CSDI) y calor (WSDI) periodo 1980-2012.	195
Figura 6.27 Número de días cálidos (SU25) para los años 1980 y 2012.	196
Figura 6.28 Número de días gélidos (IDO) para los años 1980 y 2012.	197
Figura 6.29 Tendencias Theil-Sen para no. de días cálidos (SU25) y gélidos (IDO) periodo 1980- 2012.	198
Figura 6.30 Temperatura máxima anual (TXX) para los años 1980 y 2012.	199
Figura 6.31 Temperatura máxima templada anual (TXN) para los años 1980 y 2012.	200
Figura 6.32 Tendencias Theil-Sen para Tmáx anual (TXN) y Tmáx cálida (TXN) periodo 1980-2012.	201
Figura 6.33 Porcentaje de días con Tmáx templada (TX10p) para los años 1980 y 2012.	202
Figura 6.34 Porcentaje de días con calor extremo (TX90p) para los años 1980 y 2012.	203
Figura 6.35 Tendencias Theil-Sen para porcentaje de días con Tmáx templada (TX10p) y calor extremo (TX90p) periodo 1980-2012.	204
Figura 6.36 Rango de temperatura diurna (DTR) para los años 1980 y 2012.	206
Figura 6.37 Duración de temporada media (GSL) para los años 1980 y 2012.	207
Figura 6.38 Tendencias Theil-Sen para rango de temperatura diurna (DTR) y duración de temporada media (GSL) periodo 1980-2012.	208
Figura 6.39 Precipitación máxima de 1 día (R1XD) para los años 1980 y 2012.	209

Figura 6.40 Intensidad de precipitación anual (SDII) para los años 1980 y 2012.....	210
Figura 6.41 Tendencias Theil-Sen para precipitación máxima de 1 día (R1XD) e intensidad de precipitación anual (SDII) periodo 1980-2012.	211
Figura 6.42 número de días con precipitación intensa (R10) para los años 1980 y 2012.....	212
Figura 6.43 número de días con precipitación muy intensa (R20) para los años 1980 y 2012.....	213
Figura 6.44 Tendencias Theil-Sen para número de días con precipitación intensa (R10) y muy intensa (R20) periodo 1980-2012.	214
Figura 6.45 número de días con P extremadamente intensa (RNN) para los años 1980 y 2012.	215
Figura 6.46 Precipitación total anual (Rtot) para los años 1980 y 2012.	216
Figura 6.47 Tendencias Theil-Sen para número de días con precipitación intensa (R10) y muy intensa (R20) periodo 1980-2012.	217
Figura 6.48 Precipitación total de días muy húmedos (R95) para los años 1980 y 2012.	218
Figura 6.49 Precipitación total de días extremadamente húmedos (R99) para los años 1980 y 2012.	219
Figura 6.50 Tendencias Theil-Sen para precipitación total de días muy húmedos (R95) y extremadamente húmedos (R99) periodo 1980-2012.	220
Figura 6.51 Máxima duración de temporada de estiaje (CDD) para los años 1980 y 2012.	221
Figura 6.52 Máxima duración de temporada de lluvia (CWD) para los años 1980 y 2012.	222
Figura 6.53 Tendencias Theil-Sen para máxima duración de la época de estiaje (CDD) y de lluvia (CWD) periodo 1980-2012.	223
Figura 6.54 ICC traslapados para la clasificación $P > 0$ mm de la Tabla 6.2.....	224
Figura 6.55 Clasificación de significancia Mann-Kendall para $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$	225
Figura 6.56 Clasificación de significancia Mann-Kendall para $P > 0$ mm.....	225
Figura 6.57 Significancia Mann-Kendall para temperatura media (T_m) según signo de la m_{T-S}	226
Figura 6.58 Significancia Mann-Kendall para temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$) según signo de la m_{T-S}	227
Figura 6.59 Significancia Mann-Kendall para precipitación nula ($P = 0$ mm) y precipitación no nula ($P > 0$ mm) según signo de la m_{T-S}	228
Figura 6.60 Clasificación del porcentaje de área de cuenca afectada por cambio climático (AA_{CC}).	229
Figura 6.61 Mapa de cuencas no alteradas sin riesgo climático significativo.....	230
Figura 6.62 Mapa de cuencas no alteradas con riesgo climático bajo.....	231
Figura 6.63 Mapa de cuencas no alteradas con riesgo climático moderado.....	232
Figura 6.64 Mapa de cuencas con riesgo climático alto.	233
Figura 6.65 Mapa de cuencas no alteradas con riesgo climático crítico.	234
Figura 7.1 Relación lineal entre número de nidos de ibis y la duración de las inundaciones (d) en el pantano Booligal en New South Wales, Australia. Fuente: adaptada de Driver et al. (2005).	240
Figura 7.2 Modelos no lineales (a) y lineales (b) generalizados entre caudal y efectos bióticos en una prueba del método ELOHA en Australia subtropical. Fuente: adaptada de Webb et al. (2017).	241
Figura 7.3 Mejoras de la incertidumbre al emplear modelos Bayesianos jerárquicos. Fuente: Webb et al. (2010).....	242
Figura 7.4 Red neuronal para predecir respuestas de especies de peces. Fuente: Kennard et al. (2007).	243

Figura 7.5 Red Bayesiana para predecir las respuestas del timalo (<i>Prototroctes maraena</i>) en el río Yarra, Australia. Fuente: adaptada de Shenton et al. (2013).	244
Figura 7.6 Número de especies vivas actuales clasificadas por los principales grupos taxonómicos. Fuente: Smith y Smith (2007).	245
Figura 7.7 Escala de tiempo geológica y extinciones masivas en la historia de la vida.	246
Figura 7.8 Variación de la riqueza de especies terrestres en función de la latitud: a) árboles; b) mamíferos y c) aves. Fuente: Smith y Smith (2007).	246
Figura 7.9 Producción primaria de ecosistemas marinos. Fuente: Smith y Smith (2007).	247
Figura 7.10 Producción primaria neta de varios ecosistemas terrestres en función de variables climáticas: a) precipitación media anual y b) temperatura media anual. Fuente: Smith y Smith (2007).	247
Figura 7.11 Variación de la riqueza de especies terrestres en función de la ETR: a) árboles; b) mamíferos y c) aves. Fuente: adaptadas de Currie (1991).	248
Figura 7.12 Variación de la riqueza de especies terrestres en función de la altitud: a) aves; b) mamíferos y c) plantas vasculares. Fuente: adaptadas de Smith y Smith (2007).	248
Figura 7.13 Representación gráfica de diversidad alfa (α), beta (β) y gama (γ). Fuente: adaptada de Tyler y Spoolman (2015).	249
Figura 7.14 Clasificación de vulnerabilidad de especies según IUCN. Fuente: adaptada IUCN (2017).	250
Figura 7.15 Distribución potencial de anfibios de <i>Red List</i> . Fuente: IUCN, 2017.	251
Figura 7.16 Diversidad alfa de anfibios, clase LC – sin amenaza.	252
Figura 7.17 Diversidad alfa de anfibios y mamíferos, clase NT – casi amenazada	253
Figura 7.18 Diversidad alfa de mamíferos clase VU – vulnerable y reptiles clase LC – sin amenaza.	254
Figura 7.19 Diversidad alfa de reptiles, clases NT – casi amenazada y VU - Vulnerable.	255
Figura 7.20 Diversidad alfa de reptiles clase EN – peligro de extinción.	256
Figura 7.21 Mapa de diversidad alfa de especies de anfibios en México.	257
Figura 7.22 Mapa de diversidad alfa de especies de mamíferos en México.	258
Figura 7.23 Mapa de diversidad alfa de especies de reptiles en México.	259
Figura 7.24 Correlaciones geográficas de latitud, longitud y altitud con la $B\alpha$ de anfibios, mamíferos y reptiles.	261
Figura 7.25 Correlación de temperatura media anual (a) y precipitación total anual (b) con anfibios, así como su mapa de distribución en función de la temperatura media anual y precipitación total para el año 2008 (c).	263
Figura 7.26 Correlación de temperatura media anual (a) y precipitación total anual (b) con mamíferos, así como su mapa de distribución en función de la temperatura media anual y precipitación total para el año 2008 (c).	264
Figura 7.27 Correlación de temperatura media anual (a) y precipitación total anual (b) con reptiles, así como su mapa de distribución en función de la temperatura media anual y precipitación total para el año 2008 (c).	265
Figura 7.28 Afectación de familias de anfibios por efectos de cambio climático en: a) temperatura máxima (T_{\max}); b) temperatura mínima (T_{\min}); c) precipitación no nula ($P > 0$ mm) y d) sequías o precipitación nula ($P = 0$ mm).	268

Figura 7.29 Afectación de familias de mamíferos por efectos de cambio climático en: a) temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$); b) temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$); c) precipitación no nula ($P > 0$ mm) y d) sequías o precipitación nula ($P = 0$ mm).	269
Figura 7.30 Afectación de familias de reptiles por efectos de cambio climático en: a) temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$); b) temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$); c) precipitación no nula ($P > 0$ mm) y d) sequías o precipitación nula ($P = 0$ mm).	270
Figura 7.31 Mapa de cuencas con prioridad biológica por clasificaciones NT, EN, EC y vulnerabilidad al cambio climático.	272
Figura 8.1 Ejemplo de dendograma para métodos de aglomeración.	276
Figura 8.2 Ejemplo de sobre ajuste de datos al clasificar: a) datos que se desean clasificar; b) clasificación sobre ajustada y c) clasificación sin sobre ajuste. Fuente: adaptada de Hastie et al. (2008).	279
Figura 8.3 Procedimiento para estimar valores medios de variables climáticas.	280
Figura 8.4 Validación del número óptimo de regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	283
Figura 8.5 Mapa de la distribución espacial de regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	285
Figura 8.6 Variabilidad de parámetros fisiográficos de las regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	291
Figura 8.7 Variabilidad de parámetros climáticos y ecológicos de las regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.	293
Figura 8.8 Validación del número óptimo de regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	294
Figura 8.9 Mapa de la distribución espacial de regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	298
Figura 8.10 Variabilidad de parámetros fisiográficos de las regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.	314
Figura 8.11 Variabilidad de índices de alteración hidrológica global (IAHG) y parámetros socioeconómicos.	316
Figura 8.12 Variabilidad de parámetros de cambio climático, clima y biodiversidad alfa.	317
Figura 9.1 Ejemplo de estimación de series de caudales en sitios no aforados. Fuente: adaptada de Requena et al., 2017.	321
Figura 9.2 Representación gráfica de kriging por bloques.	323
Figura 9.3 Agregación de bloques por top-kriging. Fuente: Skøien et al. (2006).	325
Figura 9.4 Comparación de pesos en top kriging. Fuente: Skøien et al. (2006).	326
Figura 9.5 Resumen esquemático del método de clasificación regional. Fuente: adaptada de Requena et al. (2017).	328
Figura 9.6 Red hídrica de México corregida en HydroDem e Hydra-Eflow a resolución de 250 m.	330
Figura 9.7 CDC de la estación 12209: El tambor, Michoacán.	332
Figura 9.8 Gráfica de caudal diario estimado por clasificación regional para la estación 12209 ‘El tambor’ ubicada en un tributario del río Lerma en el estado de Michoacán.	334

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los ríos y cuerpos de agua brindan servicios ambientales de soporte, provisión y regulación que incluyen: suministro de agua para consumo humano, pesca, recreación, agricultura, hidroelectricidad, navegación, usos estéticos, usos industriales, entre otros. (Brown y King, 2003; González y Banderas, 2011). Por otra parte, los ríos responden en forma conjunta a los cambios del entorno a través de las variaciones en sus procesos físicos, químicos y biológicos. Así mismo, se encuentran influenciados por la alteración del flujo de agua, transporte de sedimentos, cambios morfológicos, entre otras variables; que en conjunto generan un “equilibrio dinámico” (Bayley, 1995; Theodoropoulos et al., 2018).

Sin embargo, la cantidad y la calidad del recurso hídrico se han visto modificadas debido a la construcción de presas, extracción de agua para uso agrícola, urbano e industrial, rutas de navegación, contaminación de ríos y zona riparia, entre otros (Dyson et al., 2003; Tharme, 2003; Korsgaard, 2006; Richter y Thomas, 2007). Dichos factores propician una competencia por el recurso hídrico, misma que desemboca en alteraciones significativas en los regímenes, variabilidad, estacionalidad, calidad del agua en los cauces y degradación de los ecosistemas riparios.

El reconocimiento de dicha alteración eco-hidrológica ha llevado al desarrollo de diversos métodos enfocados a estimar el caudal ecológico, mismo que ha sido definido como la cantidad y calidad de agua destinada a sostener los ecosistemas riparios y los requerimientos humanos (Brisbane Declaration, 2007). En general, cualquier método para la determinación del caudal ecológico parte del paradigma del régimen hidrológico natural y del gradiente de la condición biológica. Así mismo, se reconoce que un ecosistema acuático modifica su potencial de satisfacción de servicios como respuesta al aumento de los niveles de estrés (DOF, 2012).

Diversos estudios revelan que la administración y manejo del caudal ecológico debe enfocarse al funcionamiento integral del ecosistema (Instream Flow Council, 2002; Acreman y Dunbar, 2004; Poff et al., 2010; Arthington, 2012). Hoy en día, existe una tendencia mundial por estimar el caudal ecológico a nivel regional sin considerar una ‘especie objetivo’ (Acreman, 2016). Lo anterior parece poder lograrse al caracterizar las cuencas de la región y establecer relaciones respuesta ambiental-alteración hidrológica (Poff et al., 2010).

1.1. Justificación

Un país megadiverso es aquel que cuenta con una gran diversidad de flora y fauna silvestre, es decir, donde una gran proporción de sus especies son endémicas. La Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) declaró a México, en 2002, como uno de los 17 países megadiversos ([CONABIO, 2015a](#)). El grupo de países megadiversos poseen la mayor cantidad y diversidad de animales y plantas. Casi el 70% de la diversidad mundial de especies se encuentra dentro de este grupo.

Llorente-Bousquets y Ocegueda ([2008](#)) sitúan a México, con respecto a otros países megadiversos, en el quinto lugar como país con mayor diversidad de plantas (aprox. de 21, 989 a 23,424 especies), tercer lugar con mayor diversidad de mamíferos (aprox. 564 especies), onceavo lugar en diversidad de aves (aprox. de 1,123 a 1,150 especies), segundo lugar en diversidad de reptiles (864 especies) y quinto lugar con mayor diversidad de anfibios (376 especies).

Gran parte de la diversidad de especies de México está constituida por especies endémicas. Estas especies tienen su distribución restringida a un territorio determinado. Puede ser endémica de México, de algún estado, de alguna montaña, cueva, lago, río o manantial. El tamaño y la capacidad de dispersión de las especies tienen gran influencia en su rango de distribución. Por ejemplo, entre anfibios y reptiles, donde la mayoría de las especies son pequeñas, más del 45% son endémicas ([CONABIO, 2015b](#)). Koleff y Soberón ([2008](#)) demostraron que la distribución de especies endémicas dentro del país es homogénea.

Por otro lado, es indiscutible que el equilibrio dinámico del medio ambiente ha sido alterado. La degradación del hábitat ha llevado a una alteración ecohidrológica que afecta a especies dependientes del recurso hídrico y, en general, al ecosistema. La estimación e integración del caudal ecológico a las políticas de regulación de las obras reguladoras de caudal han tenido gran impacto a nivel mundial ([Le Quesne et al., 2010](#)).

Existen diversos factores como la variedad climática del país, la biodiversidad de especies, las políticas de regulación de caudal, incrementos en el cambio de uso de suelo, sobreexplotación de acuíferos, descargas hídricas de baja calidad a cauces naturales, entre otros; que complican la aplicación de métodos holísticos de caudal ecológico en México.

La comisión mundial de presas (WCD, por sus siglas en inglés) situó a México, en el año 2000, en el doceavo lugar de países con mayor cantidad de grandes presas (537 grandes presas) ([World Commission on Dams, 2000](#)). El Sistema de Seguridad de Presas (SSP) registra 4,534 obras de regulación de caudal en México, dejando fraccionados los ríos y cuerpos de agua ([CONAGUA, 2016](#)). Otro factor sobresaliente es la sobreexplotación de acuíferos del país. De acuerdo con el Atlas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México cuenta con 653 acuíferos ([2015](#)). A octubre de 2015, 125 de los 282 acuíferos más importantes, que proveen 66% del agua utilizada en todo el país, se encuentran sobreexplotados. Su principal causa es la extracción excesiva de agua para riego agrícola.

Por tal razón, es necesario apoyarse en modelos y técnicas que permitan tratar con las incertidumbres de la información a manera de proporcionar una herramienta efectiva para los tomadores de decisión en la gestión de los recursos hídricos del país.

La diversidad de especies biológicas en México, la carencia de una regionalización eco-hidrológica y la posibilidad de desarrollar un modelo inclusivo de diferentes variables, justifican la importancia de un método robusto para estimar el caudal ecológico en todo el territorio nacional.

Los aportes científicos y tecnológicos de la presente investigación son:

- Diseño y elaboración de una base de datos de parámetros fisiográficos, hidrométricos, variables climáticas, riqueza de especies en peligro de extinción o bajo protección especial, cambio de uso de suelo, índices de alteración hidrológica, índices de cambio climático e índices socioeconómicos de las cuencas hidrográficas de México.
- Regionalización de cuencas hidrográficas con base en las variables consideradas en el estudio, así como modelos de regresión multiparamétrica que expliquen la magnitud del caudal ecológico para cuencas no aforadas.
- Diseño y elaboración de una herramienta informática, utilizando cómputo técnico, que permita: i) visualizar la información de las bases de datos; ii) calcular parámetros hidrológicos necesarios para estimar el caudal ecológico; iii) realizar regionalización de cuencas; iv) elaborar modelos de regresión multiparamétrica; vi) estimar el caudal ecológico en cuencas no aforadas y vii) emitir un reporte de resultados.

1.2. Hipótesis

Es posible estimar el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas no aforadas, o que no cuenten con un periodo de registro mínimo de 20 años, y sistematizar dicho proceso. Lo anterior, por medio de una regionalización de cuencas y estimación de caudales naturales a través de métodos de clasificación regional.

1.3. Objetivo general

Desarrollar una herramienta hidro-informática que permita estimar, de manera semi-holística, el caudal ecológico en cuencas no aforadas mediante la incorporación de un método basado en datos hidrométricos, climáticos, biológicos, antropogénicos, socioeconómicos y parámetros fisiográficos para explicar la magnitud de dicho caudal.

1.4. Objetivos específicos

- Incorporar y actualizar bases de datos de parámetros fisiográficos, hidrológicos, climáticos, obras de regulación, riqueza de especies en peligro de extinción o bajo protección especial, cambios de uso de suelo, índices de alteración hidrológica, índices de cambio climático e índices socioeconómicos para ser empleadas en el proceso de regionalización de cuencas.
- Regionalizar cuencas hidrográficas por medio de las variables potencialmente explicativas consideradas en el marco de la investigación para la construcción de modelos de magnitud de caudal ecológico.
- Aplicar métodos de estimación de caudal en sitios no aforados para cada región hidrológica obtenida, a fin de estimar su caudal ecológico.
- Diseñar e implementar una herramienta hidro-informática, utilizando el lenguaje de cómputo técnico Matlab, para la estimación del caudal ecológico en cuencas no aforadas.

CAPÍTULO 2

MÉTODO

2.1. Introducción

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, el método seguido se divide en seis fases. La primera de ellas se destina al reconocimiento y evaluación de la alteración hidrológica en los ríos mexicanos (Capítulo 4). Posteriormente, se espacializan las magnitudes de variables climáticas para su uso en el análisis de cambio climático y ecológico (Capítulo 5). La tercera fase se destina a la evaluación del cambio climático y análisis de tendencias climáticas, así como su relación con las cuencas hidrográficas (Capítulo 6). En seguida, se estima la diversidad alfa (riqueza) para especies de reptiles, mamíferos y anfibios y se analiza su posible correlación con las variables climáticas seleccionadas (Capítulo 7). En la quinta fase se realizan dos regionalizaciones de cuencas hidrológicas con base en toda la información contenida para cada cuenca (Capítulo 8). Subsecuentemente, se estiman las series de caudal ecológico natural y alterado a través de un método estadístico y se validan por un proceso de remuestreo *Jack-knife* (Capítulo 9). Finalmente, se reportan los resultados de caudal ecológico y se sistematiza la metodología mediante una herramienta hidro-informática programada en el lenguaje de cómputo técnico MATLAB (Capítulo 10).

2.2. Alteración hidrológica en ríos y cuerpos de agua

Ante el reconocimiento del cambio en parámetros y componentes en los regímenes de ríos y cuerpos de agua, se evalúa el estado hidrológico de los ríos que cuentan con estación de aforo. Se recopila información de datos hidrométricos y de obras de regulación de caudal para clasificar las series hidrométricas en Régimen Hidrológico Natural (RHN) y Régimen Hidrológico Alterado (RHA) de acuerdo con el método propuesto por Arévalo-Mejía (2015). De esta forma, se establece la línea base de los componentes del régimen natural (variabilidad, magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de cambio). Así mismo, se conforma el sustento hidrológico que se traduce como el motor para cualquier modelo de regionalización de caudal ecológico (Kendy et al., 2012; King et al., 2014).

La evaluación de las condiciones del régimen puede realizarse a través de cualquier Índice de Alteración Hidrológica (IAH) (Olden y Poff, 2003; Kennen et al., 2007; Mathews y Richter, 2007). Los IAHs permiten establecer algunas relaciones de las respuestas hábitat-alteración hidrológica (Acreman et al., 2014). Al respecto, se emplean los IAHs desarrollados por Martínez y Fernández (2006), ya que resumen los 171 parámetros propuestos por Olden y Poff (2003) y los 67 parámetros propuestos por Richter et al. (1995) en 21 IAHs parciales y 3 IAHs globales, correspondientes al régimen de caudales mínimos, caudales habituales y caudales máximos. Dicha clasificación de alteración se apega a la guía CIS-WFD (2003).

Por otro lado, se han reportado deterioros en las condiciones de hábitat debido al crecimiento poblacional y cambio de uso de suelo en Europa y el oeste de Asia (Laizé et al., 2013). Dichos efectos continuarán creciendo en tanto no se frene el crecimiento poblacional, ya que crea una fuerte demanda por energía, alimentación y usos industriales (CAWMA, 2007; Poff et al., 2010). Por tal razón, se analiza el nivel de correlación de los índices socioeconómicos generados por Cervantes-Jiménez (2015) con el estado de alteración de las cuencas, con el objeto de buscar posibles causas y/o fuerzas impulsoras de alteración.

2.3. Cambio climático

Los trabajos realizados por Norris y Thoms (1999), Moss (2010), Wilby et al. (2010), Piniewski et al. (2011), Lawrence et al. (2014), França-Costa et al. (2018) entre otros; muestran la diversidad de impactos del cambio climático sobre el caudal ecológico. Sin embargo, la realización y/o proyección de escenarios de cambio climático quedan fuera del alcance del presente trabajo de investigación. No obstante, se incluyen sus efectos mediante los 27 Índices de Cambio Climático (ICC) propuestos por el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI, por sus siglas en inglés; ETCCDI, 2015). Dichos ICC evalúan las condiciones de las siguientes variables climáticas: i) temperatura máxima; ii) temperatura mínima; iii) temperatura media y iv) precipitación. La información para su análisis se obtiene por medio de imágenes espacializadas por métodos geoestadísticos de interpolación (para ICCs a escala mensual) e imágenes del modelo de circulación Daymet V3 (para ICCs a escala diaria; <https://daymet.ornl.gov/>, 2017). La tendencia de cada ICC es analizada por medio de la pendiente Theil-Sen (Sen, 1968) y su significancia es evaluada por medio de la prueba Mann-Kendall (Kendall, 1975). Posteriormente, se obtiene el porcentaje de área bajo efectos significativos de cambio climático por cuenca hidrológica.

2.4. Análisis ecológico

Generalmente, la estimación del caudal ecológico va acompañada de características deseables para el hábitat ripario que se modele (Arthington, 2012). Dichos objetivos ecológicos están en función de la riqueza y abundancia de las especies. Así mismo, cobran importancia en áreas

donde los recursos ecológicos tienen un alto impacto económico, o bien, en áreas de reserva ecológica con especies endémicas de alguna cierta región (Poff et al., 2017, Webb et al., 2017). Por ello, se realiza un análisis de diversidad alfa (riqueza) para especies de anfibios, reptiles y mamíferos de México con datos obtenidos de la Red List (IUCN, 2017). Su objetivo es estimar la riqueza potencial en cada cuenca hidrológica de acuerdo con la clasificación de la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés; IUCN, 2017). Adicionalmente, se busca explicar relaciones geográficas y climáticas con las distribución potencial de las especies y su afectación por efectos de cambio climático.

2.5. Regionalización de cuencas hidrológicas

Con la información descrita en las secciones anteriores, se realiza una regionalización a través de un análisis jerárquico de conglomerados (*hierarchical cluster analysis*) con la finalidad de agrupar las cuencas no alteradas en su régimen hidrológico con características semejantes. Las variables consideradas para tal efecto son: i) parámetros fisiográficos de las cuencas (área, pendiente, tiempo de concentración, etc.); ii) magnitud de variables climáticas (temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación); y iii) diversidad alfa de especies (reptiles, anfibios y mamíferos). De esta forma, se garantiza la obtención de grupos de cuencas (*clusters*) cuyos ríos presentan características eco-hidrológicas homogéneas. La varianza y correlación de los *clusters* son verificadas por medio del índice *Silhouette* (Rousseeuw, 1987). Así se obtiene el número óptimo de grupos con la menor varianza al interior de cada uno de éstos. Este procedimiento se repite para las cuencas alteradas en su régimen hidrológico con la finalidad de contar con *clusters* de caudal alterado. Las variables consideradas para tal efecto son: i) parámetros fisiográficos de las cuencas (área, pendiente, tiempo de concentración, etc.); ii) índices de alteración hidrológica (IAHs); iii) índices socioeconómicos por cuenca (población, disponibilidad natural, IDH, PIB y PEA); iv) magnitud de variables climáticas (temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación); v) porcentaje de área de cuenca afectada por cambio climático y vi) diversidad alfa de especies (reptiles, anfibios y mamíferos). Así, se obtienen grupos de cuencas cuyos ríos presentan características socio-eco-hidrológicas homogéneas.

2.6. Estimación de series de caudales naturales y alterados

Después de obtener regiones con características eco-hidrológicas semejantes, se estiman las series de caudal natural a través de una curva regionalizada de duración de caudal (CDC; Requena et al., 2017). Dichas series constituyen las características eco-hidrológicas previas a la modificación de los componentes en los regímenes de ríos en México. Este procedimiento también es llevado a cabo en las regiones con características socio-eco-hidrológicas. De esta forma, se estiman las condiciones posteriores a la alteración de los componentes de caudal natural.

2.7. Sistematización del método adoptado

La última etapa corresponde a la programación del método mencionado. Para tal efecto, se emplea el lenguaje de cómputo técnico MATLAB ya que brinda ventajas en procesos de análisis numéricos y matriciales ([Moore, 2007](#)). Es importante señalar que se hace uso del *mapping toolbox* de MATLAB, lo que permite ingresar capas con referencia geoespacial en formatos *raster* (*.rst) y *shape* (archivos con extensiones *.DBF, *.SHP y *.SHX).

Para cualquier análisis de caudal ecológico en cuencas no aforadas, el usuario tendrá que ingresar las coordenadas del punto donde se ubica la desembocadura de la cuenca para la cual se realizará el análisis. La información de las variables de temperatura, precipitación, diversidad alfa, índices de cambio climático y alteración hidrológica, se encuentran dentro de las bases de datos que alimentan al programa. Para conocer la región a la que pertenece dicho punto de análisis, se realiza una re-regionalización incluyendo los datos de la cuenca asociada al punto de análisis. Al conocer el grupo de cuencas a la que pertenece la zona de estudio, se estima el caudal ecológico a través del método propuesto por Requena et al. ([2017](#)).

La Tabla 2.1 resume el método presentado y añade los entregables por cada uno de los capítulos de la investigación. Por otro lado, la Figura 2.1 muestra la secuencia y dependencia de los capítulos de la tesis.

Tabla 2.1 Resumen del método de investigación.

Capítulo 4 Evaluación de alteración hidrológica: el objetivo del capítulo es evaluar e identificar el estado de alteración hidrológica en los ríos que cuenten con estación hidrométrica. Su evaluación permite seleccionar las cuencas no alteradas para su uso en el proceso de regionalización.		
Meta	Actividad	Entregable
<ul style="list-style-type: none"> • Establecer periodos de régimen hidrológico natural (RHN) y alterado (RHA). • Conocer el estado de alteración en los ríos con estación hidrométrica. • Buscar posibles detonadores del estado de alteración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Retomar los resultados de obras de regulación de presas, obtenidos por Arévalo-Mejía (2015) para establecer RHN y RHA. • Evaluar el estado de alteración a través de los índices IAHRIS (Martínez y Fernández, 2016) y del método recomendado en la normatividad mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (DOF, 2012). Se emplea la herramienta Hydra-Eflow. • Correlacionar los indicadores socioeconómicos obtenidos por Cervantes-Jiménez (2015) con la valoración de alteración para buscar posibles detonadores de su estado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bases de datos digitales: • Fechas de regulación de presas y bordos. • Valoración de alteración hidrológica por índices IAHRIS y NMX-AA-159-SCFI-2012. • Relación de cuencas alteradas y no alteradas. • Relación socioeconómica a nivel de cuenca hidrográfica. ✓ Módulo en Hydra-Eflow para evaluar la alteración hidrológica.
Capítulo 5 Espacialización de variables climáticas por interpolación con métodos geoestadísticos: el objetivo del capítulo es modelar espacialmente la magnitud de variables climáticas de temperatura máx, temperatura mín, temperatura media y precipitación para su uso en los capítulos 6 y 7.		
<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar estaciones climáticas CLICOM con calidad estadística. • Modelar espacialmente, por interpolación con métodos geoestadísticos, variables climáticas con calidad estadística. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar pruebas de calidad estadística Wald-Wolfowitz y Correlación ordenada para verificar la independencia de los datos. • Aplicar prueba U de Mann-Whitney para verificar homogeneidad. • Identificar estructura espacial de estaciones CLICOM a través de un análisis variográfico. • Interpoliar variables de temperatura por método de Kriging con factor de cambio externo (KED Kriging) en Hydra-Eflow. • Interpoliar variables de precipitación por simulación condicional en SAMPO (Leblois y Creutin, 2013). • Validar interpolaciones a través de validación cruzada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bases de datos digitales: • Registro de variables climáticas ordenados y filtrados con calidad estadística. • Variogramas regionales para interpolación de temperatura en México. ✓ Cartografía temática digital: • Temperatura máxima, mínima, media y precipitación media a escala mensual. ✓ Módulo geoestadístico en Hydra-Eflow.
Capítulo 6 Cambio climático: el objetivo del capítulo es evaluar los efectos del cambio climático en México por variaciones en temperatura y precipitación, así como asociar las tendencias significativas a nivel de cuenca hidrológica.		
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar efectos de cambio climático en cuencas hidrológicas. • Detección de tendencias. • Estimar significancia de la tendencia. • Reconocer zonas potencialmente vulnerables a efectos de cambio climático. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimar índices de cambio climático (ICC) del ETCCDI (2015) para crear series temporales por ICC. • Estimar la pendiente Theil-Sen (Sen, 1968) para detectar la tendencia de cada ICC. • Estimar la significancia de la pendiente Theil-Sen a través de la prueba Mann-Kendall (Kendall, 1975) por variable climática. • Identificar cuencas potencialmente vulnerables a través del porcentaje de área de cuenca afectado por efectos de cambio climático significativo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bases de datos digitales: • Porcentajes de área de cuenca afectada por efectos de cambio climático. ✓ Cartografía temática digital: • Series temporales de los 27 ICC propuestos. • Pendientes Theil-Sen por ICC estimado. • Significancia Mann-Kendall por signo de pendiente Theil-Sen. ✓ Módulo ICC en Hydra-Eflow.

Tabla 2.1 (Continuación) Resumen del método de investigación.

Capítulo 7 Análisis ecológico: el objetivo del capítulo es correlacionar la información climática y geográfica con la diversidad alfa de especies de anfibios, mamíferos y reptiles de acuerdo con la clasificación del IUCN.		
Meta	Actividad	Entregable
<ul style="list-style-type: none"> • Diversidad alfa (B_α) para anfibios, reptiles y mamíferos de México. • Correlación geográfica, climática y por cuenca con B_α. • Identificar cuenca prioritarias para la preservación natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimar la B_α para especies de anfibios, reptiles y mamíferos por clases de la IUCN: LC – sin amenaza, NT – casi amenazada, VU – vulnerable, EN – en peligro de extinción y EC – en peligro de extinción crítico (IUCN, 2017). • Correlacionar la B_α por variaciones en latitud, longitud y altitud para buscar relaciones con el clima. • Correlacionar la B_α con variaciones climáticas para identificar las especies potencialmente afectadas por efectos de cambio climático. • Estimar la B_α por cuenca y establecer su prioridad por el máximo de B_α a partir de la clase EC a la clase LC del IUCN. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bases de datos digitales: • Relación del máximo de B_α por cuenca para cada clase del IUCN. ✓ Cartografía temática digital: • B_α para especies de anfibios, reptiles y mamíferos para cada clase del IUCN. ✓ Módulo de análisis ecológico en Hydra-Eflow.
Capítulo 8 Regionalización: el objetivo del capítulo es regionalizar las cuencas hidrológicas con características socio-eco-hidrológicas semejantes a través de un análisis de clasificación jerárquica para la estimación de series de caudales naturales y alterados (Capítulo 9).		
<ul style="list-style-type: none"> • Regiones de cuencas hidrológicas con características eco-hidrológicas semejantes validadas. • Regiones de cuencas hidrológicas con características socio-eco-hidrológicas semejantes validadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimar la magnitud media de las variables climáticas a nivel de cuenca hidrológica. • Regionalizar las cuencas no alteradas a través del método de partición K-medoids (Kaufman y Rousseeuw, 1990). • Regionalizar las cuencas alteradas en su régimen hidrológico a través del método K-medoids (Kaufman y Rousseeuw, 1990). • Validar los clusters obtenidos por medio del índice Silhouette (Rousseeuw, 1987). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cartografía temática digital: • Regiones eco-hidrológicas para cuencas no alteradas. • Regiones socio-eco-hidrológicas para cuencas alteradas. ✓ Módulo de <i>cluster</i> en Hydra-Eflow.
Capítulo 9 Caudal ecológico en México: el objetivo del capítulo es series de caudales naturales para cada región eco-hidrológica y series de caudales alterados para cada región socio-eco-hidrológica obtenidas en el Capítulo 8.		
<ul style="list-style-type: none"> • Series de caudales naturales para cada región eco-hidrológica. • Series de caudales alterados para cada región socio-eco-hidrológica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtener patrón de drenaje de México (resolución 250 m) para estimar series de caudales. • Estimar series de caudales naturales y alterados por método de Top Kriging (Skjøien et al., 2006) y por clasificación de curvas de duración de caudal (CDC; Requena et al., 2017). • Validar resultados de caudal. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Series de caudales naturales para cada región eco-hidrológica. ✓ Series de caudales alterados para cada región socio-eco-hidrológica. ✓ Patrón de drenaje de México a 250 m de resolución. ✓ Módulo de estimación de series de caudal en Hydra-Eflow.
Capítulo 10 Hydra-Eflow: el objetivo es presentar el manual de la herramienta hidro-informática Hydra-Eflow, registrada en INDAUTOR.		



Figura 2.1 Secuencia y dependencia de los capítulos de la presente investigación.

CAPÍTULO 3

CAUDAL ECOLÓGICO

3.1. Introducción

El caudal ecológico se define como la cantidad, calidad y variación del gasto reservado para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales ([DOF, 2012](#)).

Uno de los objetivos primordiales del estudio y análisis del caudal ecológico es establecer objetivos ambientales viables y alcanzables para la rehabilitación y/o preservación de los ecosistemas riparios ([Acreman , 2016](#)). Diversos autores concluyen que la forma más eficaz de lograr el objetivo es a través de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca donde, con el paso del tiempo, nacerán nuevos requerimientos que tendrán que ser satisfechos ([Poff, Tharme, y Arthington, 2017](#)). Para alcanzar una implementación exitosa del caudal ecológico, se requiere de un equipo multidisciplinario que aplique técnicas de modelado, implementación y monitoreo de los cauces. Cumplir con los requerimientos demandados por la sociedad, actividades económicas y por el hábitat no es una tarea fácil de resolver. Su solución plantea retos, obstáculos y desafíos que gestionarán la evolución científica de conceptos, métodos y técnicas ([Webb, Arthington, y Olden, 2017](#); [Theodoropoulos et al., 2018](#)).

Otro objetivo primordial es mejorar la comprensión de los procesos y respuestas del hábitat ante las variaciones naturales y antropogénicas ([Acreman et al., 2014](#)). Esto supone uno de los retos más desafiantes de la ciencia moderna para la estimación eficiente de los caudales ecológicos. Por varios años, estas respuestas han sido modeladas bajo el contexto de la alteración hidrológica causada por las obras de infraestructura cuya génesis data a mediados de la década de los 90's ([Richter y Thomas, 2007](#)). Tipicamente, la respuesta del hábitat ha sido enfocada a variaciones y/o modificaciones en el régimen del caudal natural así como factores del hábitat necesarios para equilibrar la riqueza y abundancia de las comunidades riparias ([King et al., 2014](#)).

3.2. Evolución de los principios científicos del caudal ecológico.

Los primeros estudios, entre las variables del régimen ripario y el desarrollo biológico de especies acuáticas, iniciaron en la década de 1940 en los Estados Unidos de América (EUA). Dichos estudios, emplearon una relación cuantificable entre la cantidad y la calidad del agua en los cauces de hábitats pesqueros. (Stalnaker y Arnette, 1976; Prewitt y Carlson, 1980). Así mismo, se examinaron por primera vez los efectos de incrementos de descargas en hábitats riparios y enfatizaron los requerimientos de estacionalidad, periodicidad, cría y mantenimiento de ciertas especies de peces para fines económicos o recreativos (Tharme, 1996; Poff y Matthews, 2013).

Posteriormente, en la década de los 70's, cobraron importancia los análisis hidrológicos. Esto se debió, principalmente, a que fueron requisitados por una nueva legislación ecológica y pesquera que acompañó al apogeo de la construcción de presas en EUA (Tharme, 2003; Korsgaard, 2006). Para 1976 se desarrolló el primer método hidrológico para el cálculo del caudal ecológico, misma que se enfocaba en mantener los niveles críticos del hábitat de especies de salmones (Tennant, 1976).

A partir de entonces se desarrollaron diversos métodos para estimar el caudal ecológico. Dado que algunas especies de plantas, peces y anfibios son sensibles a las condiciones del caudal, se argumentó que, si el régimen del caudal era apropiado para la conservación de alguna de éstas, ese mismo régimen serviría para atender otras necesidades del mismo ecosistema (Korsgaard, 2006). Sin embargo, diversos estudios revelan que el manejo y administración del caudal ecológico debe ser enfocado al funcionamiento integral del ecosistema (Acreman y Dunbar, 2004; Korsgaard, 2006; De Smedt, 2010; Poff et al., 2017).

La consideración de componentes principales del régimen de caudal natural: variabilidad, magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y sus tasas de cambio (Poff et al., 1997; Tharme, 2003) cobró importancia. De manera adicional, los componentes hidráulicos (perímetro mojado, tirante de agua, forma, velocidad de flujo, rugosidad, etc.), son elementos físicos de los ríos que tienen gran impacto en la determinación del tipo de hábitat (Stewardson y Webb, 2010; Theodoropoulos et al., 2018). Dicho impacto, está dado por la interacción entre el régimen de caudales, la geología local y la topografía. Esta compleja interacción entre caudales y fisiografía determinan la distribución, abundancia y diversidad de los organismos en ríos y corrientes (Bunn y Arthington, 2002; De Smedt, 2010; González y Banderas, 2011).

Existen diversos factores físicos, hidrológicos, biológicos, químicos e incluso sociales y económicos, que fundamentan el desarrollo de diversos métodos para estimar el caudal ecológico. Cada método atiende a uno o varios componentes del caudal natural, componentes hidráulicos o factores biológicos. Su objetivo es preservar y/o mejorar las condiciones de todo el ecosistema ripario y asegurar condiciones naturales suficientes en el futuro para la humanidad y el hábitat (Brown y King, 2003; Acreman, 2016).

Los primeros métodos para estimar el caudal ecológico se sustentaron en la idea que la degradación del río está directamente asociada con cualquier tipo de alteración del régimen hidrológico de los cauces (Poff et al., 2017). Se sostenía que tan pronto como el caudal se mantuviera arriba del nivel crítico necesario para la conservación de las especies, el ecosistema se conservaría. Sin embargo, se ha reconocido que todos los elementos del régimen del caudal, incluyendo inundaciones, caudales medios y caudales mínimos son significativos (Acreman y Dunbar, 2004; Bond et al., 2018). Consecuentemente, si el objetivo es mantener el ecosistema de un río, el caudal ecológico tendrá que ser lo más cercano al régimen del caudal natural (Poff et al., 1997).

Un ecosistema está compuesto, no sólo por las comunidades de peces, sino también por comunidades de plantas y macroinvertebrados, entre otros organismos, que interactúan en un mismo hábitat. Los ecosistemas lóticos, lénticos y riparios proveen seguridad económica (e.g. producción acuícola para la alimentación, producción de medicamentos para la salud, producción maderera para bienes industriales y sociales, etc.) (Emerton y Bos, 2004; Cowx y Portocarrero, 2011). Por ello, la asignación del caudal ecológico, con base en los requerimientos de una especie ‘objetivo’, entró en discusión. Adicionalmente, existe un fuerte debate sobre quién y cómo se asignan los porcentajes de caudal ecológico, cómo determinan los escenarios de las condiciones deseadas, y si el monitoreo constante del caudal refleja las mejoras planteadas (King y Brown, 2010; Poff et al., 2010; Acreman et al., 2014; Bond et al., 2018).

Los debates señalados introdujeron nuevas perspectivas y preguntas dentro de la gestión del caudal ecológico. El modelaje sobre variación caudal – modificación hábitat – respuesta especie ha contribuido notablemente a establecer relaciones ecológicas para estudios más detallados. Sin embargo, dichas relaciones han sido el producto de estudios bio-hidrológico empíricos que, en su mayoría, reflejan algunas relaciones particulares de los hábitats de países desarrollados (Davies et al., 2014). Dado que las condiciones físicas (clima, morfología, topografía, etc.), sociales (grupos étnicos, población, área urbana) y económicos (PIB, crecimiento económico anual, etc.) difieren de región a región y de país a país, las relaciones obtenidas no aplican en todas las regiones (Poff et al., 2017). Por ello, cada región debe incluir programas tácticos y estudios regionales y/o locales para la obtención de información biológica-hidrológica de las especies presentes, en especial las endémicas.

Uno de los principales problemas durante el modelado de respuestas ambientales ante posibles modificaciones, es la escasa información biológica-ecológica documentada previa a la ocurrencia de alteraciones en el hábitat (Carlisle, Wolock, y Meador, 2011; Olden et al., 2014; Poff et al., 2017). Sin embargo, la presencia de grupos nativos dentro de las áreas de estudio puede favorecer la obtención de conocimiento para revelar posibles respuestas ecológicas de manera local (Jackson et al., 2014).

Por otro lado, el crecimiento desproporcionado por la demanda del recurso hídrico es generado, en gran medida, por la necesidad de cubrir las necesidades humanas en cualquiera de los tres

sectores de actividades económicas (Alonso-EguíaLis et al., 2007; Tyler y Spoolman, 2015). Dentro de las causas más importantes que han acrecentado las alteraciones hídricas de los caudales se encuentran: i) construcción de obras reguladoras de caudal; ii) sobreexplotación de acuíferos; iii) inadecuado control del volumen, calidad y parámetros fisicoquímicos de las descargas a los cuerpos de agua; iv) poco conocimiento de las condiciones hídricas de los caudales, que lleva a una desafortunada toma de decisiones en el manejo y administración del agua y v) acelerado crecimiento poblacional, mancha urbana y red de carreteras, que modifican el escurrimiento y flujos de agua en la cuenca (Garrido et al., 2010; Tyler y Spoolman, 2015).

Diversos estudios han apuntado a las estructuras hidráulicas como el principal factor de alteración del régimen hidrológico (Dyson et al., 2003; Richter y Thomas, 2007; Mackayet al., 2014). De forma simultánea al control del caudal, la sobreexplotación de acuíferos ha producido un deterioro ecológico, reduciendo los caudales mínimos por debajo de cualquier criterio ecológico (Streetly et al., 2014; Hendriks et al., 2014; Gleeson y Richter, 2018). Kenne et al. (2014) demostraron que las extracciones de agua subterránea reducen el 20% de los macroinvertebrados intolerantes en Nueva Jersey, EUA. Por otro lado, Laizé et al. (2013) reportaron el deterioro de las condiciones de hábitat debido al crecimiento poblacional y cambio de uso de suelo en Europa y el oeste de Asia.

Los cambios en el caudal coinciden frecuentemente con cambios en la temperatura del río (Lawrence et al., 2014), la morfología de los canales (Bond et al., 2018) y la calidad del agua (Norris y Thoms, 1999; Moss, 2010). Adicionalmente, los ecosistemas, con una fuerte dependencia del recurso hídrico, modifican su respuesta hídrica a causa de los efectos del cambio climático (Piniewski et al., 2011; Thompson et al., 2014; Paredes-Tavares et al., 2018). Lo anterior, ha llevado a los ecosistemas a auto reformar sus condiciones de referencia (Wilby et al., 2010) en respuesta a diversos factores de alteración que, día con día, crecen en impacto socioeconómico y ecológico (Yarnell et al., 2015).

En cuanto al aspecto social y político, la implementación del caudal ecológico ha tenido un fuerte impacto en la formulación de políticas ambientales a nivel internacional. Desde 1992 la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en Río de Janeiro, promovió la concesión de los derechos de los recursos hídricos a las especies, junto a los derechos exigidos por la sociedad (Acreman y Dunbar, 2004). Posteriormente, la Cumbre Mundial de Johannesburgo sobre el Desarrollo Sostenible (2002) mencionó la protección ambiental como principal pilar del desarrollo sostenible (Acreman, 2016).

La reunión Río +20 (<http://www.uncsd2010.org>) hizo un llamado al manejo integrado y sostenible de los ecosistemas. Reconoció que la pérdida global de la biodiversidad y la degradación de los ecosistemas reducen el desarrollo global (Costanza y Daly, 1992), afectando la seguridad en salud y nutrición de las zonas rurales (Acreman et al., 2014). De esta forma, el caudal ecológico se ha convertido en un importante detonador en la promoción de leyes y políticas de diversos países (Le Quesne et al., 2010). Como resultado, su desarrollo ha requerido la inclusión de personal multidisciplinario, en donde la comunicación entre

investigadores, científicos, gestores del recurso hídrico, gestores políticos y de la sociedad misma, ha cobrado vital importancia (Acreman et al., 2014; Poff et al., 2017).

En enero de 2016, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) puso en marcha los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para mejorar la calidad de vida y las condiciones del medio ambiente de manera sostenible (PNDU, 2016). En materia ambiental, los ODS se centran en la mitigación del cambio climático, preservación, conservación y rehabilitación de ecosistemas terrestres y de la vida submarina. El caudal ecológico es un reflejo del manejo integral de los recursos hídricos a nivel de cuenca y coadyuva al cumplimiento del plan estratégico de los ODS.

En 1988, concebido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (UNEP, por sus siglas en inglés), se inició el protocolo de la Convención en Diversidad Biológica (CBD, por sus siglas en inglés) que fue firmado en Nairobi, Kenya en 1993. Actualmente, la CBD ha realizado numerosos encuentros entre científicos, investigadores y tomadores de decisión para implementar políticas de protección ambiental y caudal ecológico en diferentes países (<https://www.cbd.int/information/parties.shtml>).

Las recientes investigaciones sobre caudal ecológico han llevado a una evolución en la materia. Dicha evolución busca comprender, de la mejor manera, las relaciones entre la alteración de algún componente del régimen hidrológico de caudales con el ambiente (Acreman et al., 2014). Hablar de caudal ecológico, es hablar de un componente importante de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) (Speed et al., 2011).

En México, el tema de caudales ecológicos tomó importancia desde 1988 con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (DOF, 1988). Posteriormente, en 1992, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) (DOF, 1992) incluyó el término “agua de uso ambiental” para referirse al caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema. En 2007 se llevó a cabo en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) el Foro Internacional sobre la Determinación del Uso Ambiental del Agua o Caudal Ecológico. Se analizó la importancia de la conservación del hábitat y se reconoció al ambiente como el usuario prioritario del agua (Alonso-EguíaLis et al., 2007; González y Banderas, 2011). En 2012 se aprobó la Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas en el país (DOF, 2012). Esto brindó la pauta para el desarrollo, investigación y adaptación de métodos que brindan un resultado eficaz para las condiciones climáticas y geográficas de México. Sin embargo, cabe señalar que la norma mexicana no es de carácter obligatorio, sino una referencia de métodos y objetivos ambientales para gestores e investigadores en la materia.

Actualmente, existe un fuerte interés del sector ambiental y de la CONAGUA en establecer regulaciones, lineamientos y métodos de referencia para la determinación de caudales ecológicos en cuencas y ríos mexicanos.

3.3. Paradigma del régimen natural de caudales.

La morfología de un río es la respuesta entre el equilibrio de la masa de agua que escurre y la energía de la corriente (Fernández Yuste, 2003). Dicha energía está en función de las variables físicas de los cauces (e.g: pendiente, velocidad, perímetro mojado, coeficiente de rugosidad, etc.). Las curvas, meandros y pozas son el resultado del equilibrio entre la pendiente del cauce, la geología del lugar, y la masa de agua líquida que se transporta (Bierman y Montgomery, 2013). Estos elementos constituyen la parte abiótica de los ecosistemas riparios. Sin embargo, tienen una gran influencia en la distribución, composición y desarrollo de organismos bióticos (Arthington et al., 2006).

Dentro de los elementos que conforman el régimen de caudales, los caudales máximos y mínimos mantienen la morfología de los ríos en equilibrio (Martínez y Fernández, 2006; Hughes et al., 2014). Los caudales máximos garantizan la conectividad transversal, longitudinal y vertical de los ríos, propiciando un flujo bidireccional del agua, organismos, sedimentos y nutrientes (Poff et al., 2017). La conexión vertical beneficia los niveles piezométricos de los acuíferos, permitiendo su recarga y coadyuva el flujo subterráneo (Bond et al., 2018). La magnitud, variabilidad y duración de las crecidas tienen implicaciones en la granulometría de los sólidos transportados, remoción del lecho y dinámica de sedimentación en los ríos (Theodoropoulos et al., 2018).

Por otro lado, los caudales mínimos generan las condiciones favorables para la subsistencia de organismos en sus fases juveniles (Bunn y Arthington, 2002). Adicionalmente, modifican la configuración longitudinal y transversal del río y reducen la erosión del cauce (Mathews & Richter, 2007). Su alteración facilita la introducción de especies invasoras al nicho ripario. En casos extremos, el seccionamiento longitudinal aísla las comunidades de organismos y genera sequía en la zona riparia (Fernández Yuste, 2003; González y Banderas, 2011). La Figura 3.1 muestra la conexión entre los elementos del régimen natural de caudales y la biodiversidad.

El reconocimiento del paradigma del régimen natural de caudales (Poff et al., 1997) ha llevado al desarrollo de diversos indicadores ecológicos que guían las relaciones eco-hidrológicas por diferentes periodos de tiempo para un nivel particular de alteración (Acreman et al., 2014). Poff et al. (2010) presentan una serie de hipótesis para las relaciones caudal-hábitat, que describen los resultados esperados bajo condiciones de caudales mínimos extremos, caudales mínimos, caudales generadores de pequeñas inundaciones y caudales máximos (ver Tabla 3.1). Sin embargo, pueden surgir nuevas relaciones en función de las condiciones particulares de caudal en cada región y la abundancia de especies en el sitio.

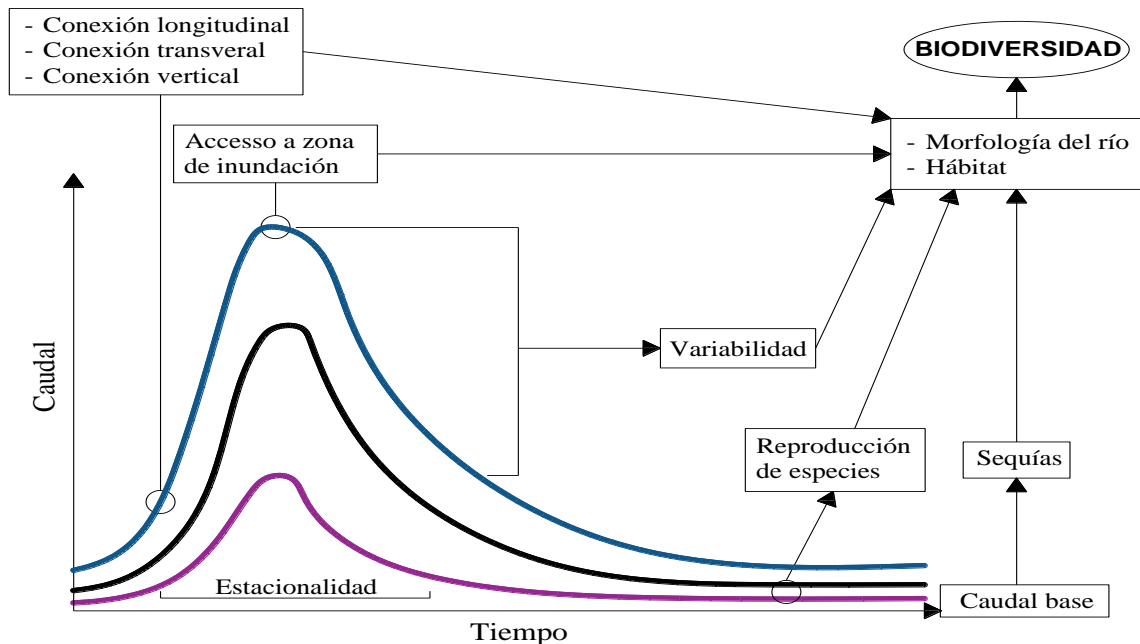


Figura 3.1 Paradigma del régimen natural de caudales (adaptado de: [Bunn y Arthington, 2002](#)).

Tabla 3.1 Ejemplos de las hipótesis que describen las respuestas ecológicas ante la alteración hidrológica ([Poff et al., 2010](#)).

Caudales mínimos extremos.

- La constante presencia de caudales mínimos extremos, y la subsecuente sequía, lleva a la rápida pérdida de diversidad y biomasa en invertebrados y peces debido a disminución del perímetro mojado del río, reducción del área de las pozas alimentadas por la corriente, pérdida de conectividad del río que lleva al aislamiento o parches del hábitat y pérdida de la calidad del agua.
- El incremento de la duración de caudales mínimos extremos en ríos intermitentes lleva a la rápida pérdida de diversidad y biomasa en invertebrados y peces debido a la reducción del hábitat acuático y degradación de la flora acuática, favoreciendo la introducción de especies invasoras.

Caudales mínimos.

- La alta frecuencia de caudales mínimos conduce a la reducción progresiva de la producción secundaria total debido a que la calidad del hábitat se convierte en marginal o se pierde.
- El cambio de caudales mínimos extremos a caudales mínimos conduce a un aumento inicial en la producción primaria y secundaria total, pero esto disminuye con la inundación de los rápidos y/o aumento de la turbidez y disminución de la penetración de la luz.
- El incremento en la magnitud de los caudales mínimos origina una caída en la riqueza de especies con preferencias por flujos lentos y hábitats de aguas poco profundas.
- La duración moderada de los caudales mínimos aumenta el establecimiento y persistencia de la vegetación acuática y ribereña, con cambios concomitantes en la distribución de las especies hacia una mayor dominancia.

Caudales generadores de pequeñas inundaciones.

- La disminución en frecuencia de eventos de flujo que modifican el sustrato lleva a desplazar a las especies de invertebrados de cuerpo grande a corrientes no aptas para sus funciones.
 - La disminución en frecuencia de eventos de flujo que modifican el sustrato conduce a la reducción de la riqueza de especies de invertebrados bénticos, debido a la acumulación de sedimentos finos y el bloqueo de espacios intersticiales del sustrato.
 - El aumento en la frecuencia de los eventos que modifican el sustrato conduce a un cambio hacia especies de invertebrados con capacidad de recolonización rápida y la pérdida de especies con capacidad de recolonización pobre.
 - El aumento en la frecuencia de inundaciones (en los canales) reduce la riqueza de especies de peces jóvenes, pero su disminución favorece la introducción de especies a tolerantes a inundaciones.
 - La disminución en la variación interanual de la frecuencia de inundaciones disminuye la riqueza total de especies de peces y vegetación riparia.
 - Cambios en la frecuencia de pequeñas crecidas da lugar a cambios en la geometría del canal (depende de los materiales del canal).
-

Caudales máximos.

- La disminución de frecuencia o de la llanura de inundación por caudales máximos, conduce a la reducción de invertebrados, peces y biomasa debido a la pérdida del hábitat inundado y los recursos alimenticios que apoyan el crecimiento y reclutamiento.
 - Los aumentos en la frecuencia de inundación de la llanura mejorarán la productividad de especies de vegetación de ribera mediante una mayor actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes, hasta un punto de anegamiento, después de lo cual la productividad se reduciría debido a las condiciones anaeróbicas del suelo.
-

3.4. Principales métodos para estimar el caudal ecológico

Existe una gran variedad de métodos para estimar el caudal ecológico. De acuerdo con Brown y King (2003), las evaluaciones de caudal ecológico pueden ser de dos tipos:

- a) Prescriptivas: usualmente dirigidas a objetivos específicos que resultan en recomendaciones de valores de flujo o régimen de caudales para componentes particulares del ecosistema. La estimación está orientada a justificar un valor simple y, por otra parte, no cuentan con información suficiente sobre las implicaciones de los resultados, por no considerar otras visiones.
- b) Interactivas: se enfocan en las relaciones entre los cambios provocados en el caudal del río, considerando más de un aspecto de éste. Una vez que dichas relaciones se establecen, la recomendación no se restringe a un simple valor, sino que se contemplan sus posibles escenarios y se establecen diversos valores y combinaciones.

En general, los métodos se pueden clasificar en cuatro grupos: hidrológicos, hidráulicos, simulación de hábitat y holísticos. Cada grupo se describe en los párrafos sucintos.

3.4.1. Métodos hidrológicos

Son los métodos más simples y económicos que existen para determinar el caudal ecológico. Comúnmente son referidos como métodos de gabinete y se basan, principalmente, en análisis estadísticos de registros históricos de estaciones hidrométricas, es decir, en mediciones de caudal (Korsgaard, 2006). La premisa base de este tipo de métodos reposa en que el ecosistema acuático de un río está en función del régimen hidrológico que el cauce ha experimentado a lo largo del tiempo. Así mismo, están orientados a mantener las condiciones observadas de manera natural. En algunos métodos, el caudal ecológico es determinado como una fracción del caudal medio anual. En general, tienen poca precisión cuando se busca preservar una cierta especie de un hábitat acuático (Belzile et al., 1997).

El método de Tennant o de Montana (Tennant, 1976) es el más conocido en esta categoría. Sin embargo, existen otros métodos como: método de Hoppe (1975), método de Arkansas (Filipeck et al., 1987; Ebert et al., 1990), método de Utah (Geer, 1980), *New England Flow Method* (NEFM) (Rousselle et al., 1990), la propuesta por Richter et al. (1997), entre otros. Los métodos estadísticos realizan un análisis de frecuencias de caudales mínimos, tales como: el caudal mínimo de siete días consecutivos con periodo de retorno de diez años (7Q10) y el caudal mínimo de siete días consecutivos con periodo de retorno de dos años (7Q2) (Chiang y Johnson, 1976) y el NGPRP (por sus siglas en inglés) (Northern Great Plains Resource Program, 1974).

Estos métodos proporcionan una estimación rápida del caudal ecológico. Generalmente son empleados en etapas de planeación (o anteproyectos) ya que sólo consideran datos históricos de caudales. No obstante, su evolución ha llevado al desarrollo de métodos de evaluación rápida tomando en cuenta datos ecológicos e índices morfológicos de los ríos (Hughes et al., 2014).

3.4.2. Métodos hidráulicos

Los métodos hidráulicos establecen una relación entre la riqueza de especímenes acuáticos y el caudal en un cierto punto del río. Se asume la relación entre parámetros hidráulicos (e.g: perímetro mojado, tirante de agua, velocidad de flujo, rugosidad, granulometría, etc.) y la diversidad biológica de un cierto hábitat (Korsgaard, 2006; González y Banderas, 2011). Algunos parámetros físicos dependen de la estacionalidad o periodo del año en que se tomen (Belzile et al., 1997). El caudal ecológico es dado como el tirante que representa las condiciones mínimas, debajo de las cuales el hábitat se deteriora rápidamente. El método más conocido es el de perímetro mojado (Reiser et al., 1989). Estos métodos proporcionan buena eficiencia en secciones de un río o tramo de estudio. Sin embargo, el costo de su aplicación se eleva si se desean aplicar a nivel de cuenca (Acreman y Dunbar, 2004; Acreman et al., 2014).

Este tipo de métodos han sido aplicados por una amplia variedad de países desarrollados y son aceptados por brindar las bases de respuestas caudal-especie (Arthington, 2012). Si bien el

caudal está relacionado con la presencia y distribución de especies riparias, son los parámetros físicos de los ríos los que mejor describen las reacciones y/o preferencias de ciertas comunidades ([Lamouroux et al., 2015](#)).

3.4.3. Métodos de simulación de hábitat

Paralelamente al desarrollo de los métodos hidráulicos, se diseñaron los métodos de simulación de hábitat. Estos métodos son ampliamente usados, ya que se basan en respuestas hidrológicas, hidráulicas y biológicas del hábitat. Sus fundamentos son: i) cada especie tiene determinadas tolerancias ante ciertos parámetros del caudal (velocidad de flujo, profundidad, tipo de sustrato, etc.); ii) los límites de las tolerancias pueden ser determinados de manera detallada para cada especie y iii) a partir de las características del cauce, se puede determinar la cantidad y calidad de hábitat de las especies en función del caudal ([Tharme, 2003](#); [Acreman y Dunbar, 2004](#); [Korsgaard, 2006](#); [González y Banderas, 2011](#)). Dentro de los más utilizados se encuentran: *Physical Habitat Simulation Model* [PHABSIM] y *Riberine Habitat Simulation Model* [RHABSIM] ([Bovee, 1986](#)).

Estos métodos han tratado de englobar los requerimientos hídricos de cada especie analizada, así como sus ciclos de vida ([Annear et al., 2004](#); [Arthington, 2012](#)). Debido a que requieren una cantidad considerable de insumos, no son ampliamente aplicados en países en desarrollo. Sin embargo, sus principios metodológicos permitieron el desarrollo de métodos más robustos: los holísticos ([USAID, 2016](#)).

3.4.4. Métodos holísticos

Los métodos holísticos comprenden estudios hidrológicos, hidráulicos, modelos de simulación de hábitat e hidroquímicos. Por la amplia variedad de estudios realizados, estos métodos proporcionan una perspectiva más amplia de las condiciones del hábitat con una mayor precisión en la estimación del caudal ecológico ([Brown y King, 2003](#); [Blake et al., 2011](#)). Generalmente, se aplican en cuencas con problemas muy específicos de estrés hídrico, o bien, donde es imprescindible rescatar especies endémicas en peligro de extinción ([McClain et al., 2014](#)).

Entre los métodos más conocidos se encuentra el *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM) ([Bovee, 1982](#)) desarrollado en EUA. En Sudáfrica se diseñó el *Downstream Response to Imposed Flow Transformation* (DRIFT) ([King et al., 2003](#); [King et al., 2014](#); [Lokgariwar et al., 2014](#)) que tuvo sus cimientos en el Método por Construcción de Bloques (BBM, por sus siglas en inglés) ([Tharme y King, 1998](#)). Finalmente, en Australia fue desarrollado *The Holistic Method y Benchmarking Method* ([Arthington A. H., 1998](#)). Los métodos DRIFT y BBM pavimentaron el camino para el desarrollo de métodos más robustos a nivel de escritorio

(Hughes et al., 2014) o a nivel operativo para un análisis dinámico del caudal como el método de Savannah (Warner et al., 2014).

Sin embargo, los sistemas riparios presentan modificaciones continuas, lo que da génesis a nuevas demandas hidrológicas que coadyuvan el estrés hídrico del hábitat. De esta forma, se ha planteado que cualquier método holístico debe responder a tres principios: i) su magnitud debe ser prescrita de manera regional; ii) debe reflejar las relaciones alteración caudal – modificación hábitat – respuesta especies y iii) su implementación debe ser monitoreada continuamente para identificar, evaluar y, en caso necesario, modificar los modelos y procedimientos empleados (Poff et al., 2017).

Poff et al. (2010) plantearon un método conocido como *The Ecological Limits of Hydrological Alteration* (ELOHA) que incluye la labor científica y social para la restauración de las condiciones riparias. Compuesta de cuatro pasos científicos (Fundamento hidrológico, Clasificación de ríos, Alteración hidrológica y Relaciones caudal-hábitat) y una sección social, ELOHA establece un marco de referencia para métodos holísticos regionales (Figura 3.2). Sin embargo, su implementación requiere de una cuantiosa cantidad de información hidrológica y biológica (Blake et al., 2011; Arthington, 2012; Olden et al., 2014). Los reportes de su implementación han convergido en una limitante común: ¿Cómo reducir la incertitud de las respuestas de poblaciones de especies ante las variaciones hidrológicas, climáticas y antrópicas? (Carlisle et al., 2011; Lamouroux et al., 2015). Algunos modelos que han dado respuesta a esta interrogativa se abarcan en el Capítulo VII.

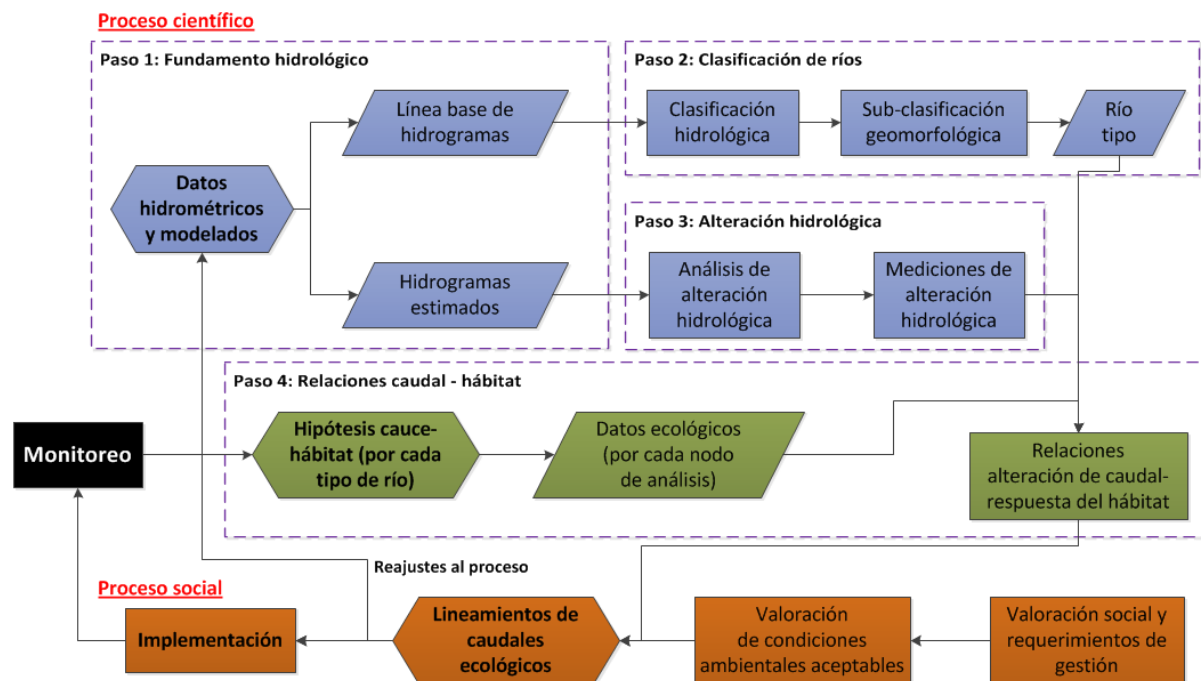


Figura 3.2 Método ELOHA propuesta por Poff et al. (2010).

Tabla 3.2 Resumen de las características generales de métodos para estimar el caudal ecológico. Fuente: adaptada de [DOF \(2012\)](#) y [Poff et al. \(2017\)](#).

Método	Ventajas	Desventajas	Información requerida	Experiencia requerida	Aplicación recomendada
Hidrológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • Fácil de estimar. • Requiere poca información. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se asume la relación con el hábitat. • Baja resolución. 	<ul style="list-style-type: none"> • Registros históricos de caudales naturales. • Relaciones básicas del hábitat. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrológica. • alguna experiencia en ecología. 	<ul style="list-style-type: none"> • Etapas de planeación • Anteproyectos • Regionalización de ríos • Como herramienta en métodos más robustos
Hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Modela el sitio estudiado. • Mediana resolución. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se asume la relación con el hábitat. • Moderado trabajo de campo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimientos hidráulicos genéricos del hábitat acuático para especies objetivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrológica • Modelación hidráulica. • alguna experiencia en ecología. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión de recursos hídricos en ríos de baja a mediana importancia ecológica. • Herramienta en métodos de simulación y holísticos.
Simulación de hábitat	<ul style="list-style-type: none"> • Modela relaciones con el hábitat y las variables de entrada. • Alta resolución. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo. • Extensa recopilación de información. • Uso de grupo multidisciplinario. 	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de hábitat para especies objetivo. • Forma del canal. • Transporte de sedimentos. • Calidad del agua. • Vegetación de ribera. • Fauna silvestre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrológica. • Modelación hidráulica avanzada y hábitat. • Especialista en ecología sobre necesidades físicas de especies objetivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión de recursos hídricos en ríos de alta importancia ecológica. • Áreas ecológicas de modelación compleja. • Escenarios ecológicos para analizar posibles respuestas de especies riparias.
Holísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Cubre la mayor parte de variables convergentes en la zona de estudio. • Resolución muy alta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo muy elevado. • Requiere un extenso grupo multidisciplinario. 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda la anterior. • Acuíferos. • Humedales y estuarios • Llanura de inundación. • Dependencia social del ecosistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda la anterior. • Especialistas en todos los componentes del ecosistema. • alguna experiencia en requerimientos socioeconómicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión de recursos hídricos en ríos de alta importancia ecológica. • Rehabilitación de ríos altamente contaminados y/o alterados.
Regionales	<ul style="list-style-type: none"> • Las mismas de los métodos holísticos, pero a escala regional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución generalizada para todas las especies de una cierta región. • Carencia de precisión en áreas locales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda la anterior. • Parámetros fisiográficos de cuencas hidrográficas. • Regionalización de cuencas hidrográficas. • Modelado de respuestas por alteración caudal – hábitat – sociedad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda la anterior. • En algunos casos, especialista en minería de datos y/o <i>machine learning</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión de recursos hídricos en regiones de alta importancia ecológica. • Trasvases internacionales. • Integración a planes estratégicos tácticos para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH).

3.5. Selección del método

Ante la gran diversidad de métodos existentes, es común preguntarse cuál es el adecuado para estimar el caudal ecológico. La respuesta está en función de las condiciones ecológicas, sociales, políticas, culturales y económicas de la zona de estudio ([Millenium Ecosystem, 2005](#)). Para tal fin, se deben considerar diversos aspectos como: evaluación de las necesidades del caudal ecológico, información preliminar de la zona de estudio, elaboración de modelos de hábitat y modelos hidrodinámicos, políticas de gestión de los sitios de control y/o regulación de caudal, aspectos legales y económicos, entre otros ([Belzile et al., 1997](#); [Poff et al., 2010](#); [Waerner et al., 2014](#)).

Se ha demostrado que ningún método es necesariamente mejor que otro ([Acreman y Dunbar, 2004](#); [Arthington, 2012](#); [Poff et al., 2017](#)). Cada uno de los métodos disponibles pueden ser usados para diferentes aplicaciones (e.g. mientras que un método hidrológico es fácil y barato de aplicar, el costo de su aplicación se eleva en lugares donde la protección de alguna especie en peligro de extinción o bajo protección especial sea requerida). El *Instream Flow Council* ([2002](#)), [Postel y Richter \(2003\)](#), [Tharme \(2003\)](#), [Dyson et al. \(2003\)](#), [Brown y King \(2003\)](#) y [Korsgaard \(2006\)](#) enlistan los siguientes inconvenientes que, de manera general, se presentan en los métodos existentes para estimar el caudal ecológico:

- a. Frecuentemente se asume la relación entre el caudal con las funciones y/o componentes del ecosistema. Sin embargo, dichas relaciones no se encuentran suficientemente documentadas.
- b. Hacen énfasis en un caudal mínimo pero la variabilidad del régimen es igualmente importante.
- c. Hacen énfasis en los requerimientos hídricos de los sistemas riparios, mientras que los requerimientos de los sistemas lóticos, humedales, estuarios y deltaicos son descuidados.
- d. Existe poca atención en los requerimientos para mantener los procesos morfológicos.
- e. Ninguno de los métodos ha sido rigurosamente probado, se requiere de una experimentación más detallada.
- f. Los métodos de simulación de hábitat y holísticos confían en alto grado en el juicio de los expertos.
- g. Generalmente se ignoran aspectos socioeconómicos.

En México, conforme con la norma para el caudal ecológico NMX-AA-159-SCFI-2012; cualquier método o combinación de métodos, es válida si: i) permite entender el significado ecológico de cada componente del régimen hidrológico natural y genera propuestas para su conservación o restablecimiento total o parcial; ii) las propuestas consideran el intervalo natural de variabilidad hidrológica, tanto en las condiciones ordinarias como el régimen de perturbaciones y iii) reconoce que un ecosistema acuático modifica sus atributos como respuesta al aumento de los niveles de estrés, y por lo tanto, permiten ajustar las propuestas de caudales ecológicos a los objetivos ambientales o de conservación del río ([DOF, 2012](#)).

CAPÍTULO 4

ALTERACIÓN HIDROLÓGICA

4.1. Introducción

Cualquier estudio de caudal ecológico requiere establecer una línea base de las condiciones hidrológicas en los ríos a estudiar, así como los resultados deseados en un cierto tiempo (Poff et al., 2017). Esto permite evaluar si las características del régimen en el río han sido modificadas. Además, sienta las bases para trazar algún plan estratégico de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) para la recuperación y/o rehabilitación de los cuerpos de agua (Speed et al., 2011). Una alteración favorable o desfavorable queda sujeta a las necesidades del ecosistema, al crecimiento económico, a las demandas de la sociedad, entre otros (Carlisle et al., 2011; Arthington, 2012; O'Brien et al., 2018).

Sin embargo, el término “alteración hidrológica” (AH) comúnmente engloba modificaciones en el régimen de escurrimiento en los ríos (Mackay et al., 2014); alteraciones en el régimen de sedimentos (Wohl et al., 2015); cambio climático que afecta directamente a la temperatura del agua de los ríos y su evaporación (Maheu, Poff, y St-Hilaire, 2016; Paredes-Tavares et al., 2018); variaciones en parámetros fisicoquímicos (Lawrence et al., 2014); degradación de la calidad química (Moss, 2010); entre otros. Sin embargo, en el marco de la presente investigación, se limita el término “alteración hidrológica” al análisis de componentes del régimen hidrológico de caudales.

El análisis de AH requisita parámetros ambientalmente significativos para evaluar el estado del caudal de un río. Aspectos del régimen que estén fuertemente ligados a los componentes, procesos, estacionalidad y dinámica del ecosistema deben ser seleccionados (Martínez y Fernández, 2006). Es esencial que dicha selección permita analizar el estado hidrológico bajo diferentes condiciones temporales (e.g: años secos, medios y húmedos), o bien por tipo de río (e.g: perene o intermitente) (Poff et al., 2010; O'Brien et al., 2018).

Los orígenes de los parámetros estadísticos de AH fueron propuestos por Richter et al. (1995). 67 parámetros relacionados con el régimen de caudales tuvieron buena aceptación por la comunidad científica debido al significado ecológico que suponían. Sin embargo, diversos estudios han demostrado la correlación existente entre algunos de los indicadores presentados

(Olden y Poff, 2003; St-Hilaire et al., 2009). Por tal razón, se ha reducido el número de parámetros a los mínimos necesarios para un correcto análisis.

Un ejemplo de la labor de resumen fue presentado por Martínez y Fernández (2006) quienes integraron indicadores para evaluar tres aspectos fundamentales del régimen de caudales: i) magnitud y variabilidad de caudales anuales; ii) variabilidad y estacionalidad de las aportaciones mensuales y iii) variabilidad de los valores extremos máximos y mínimos. En 2007 *The Nature Conservation* expuso una herramienta digital para la estimación de indicadores de AH donde incluyeron la estimación de pulsos altos y bajos (Matthews y Richter, 2007). Posteriormente, se realizaron propuestas para analizar las tasas de incremento y decremento del régimen (Auerbach et al., 2012). En México, la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 presenta un método de referencia para evaluar la alteración en los ríos con base en los percentiles de las aportaciones mensuales y anuales de las series de registro de caudales de las estaciones hidrométricas (DOF, 2012).

Actualmente, existe un fuerte debate sobre qué parámetros explican mejor la dinámica hídrica de los cauces, así como sus efectos en las comunidades biológicas presentes y sus impactos en las actividades humanas. Sin embargo, con frecuencia se reconoce al régimen hidrológico natural (RHN) como un estado de referencia cuyas características se desean conservar. El periodo de registro de caudales más reciente se supone como régimen hidrológico alterado (RHA) (Auerbach et al., 2012; Poff et al., 2017).

Paradigma de diseño

Los estudios de alteración hidrológica parten del paradigma del régimen natural de caudales (Poff et al., 1997), el cual establece al RHN como condiciones de referencia y evalúa el RHA. Lo anterior se cumple en ríos cuyo régimen no se ha modificado notablemente y se prioriza la conservación de las condiciones naturales. También se cumple en ríos moderadamente alterados donde la rehabilitación es viable a bajos costos (Acreman et al., 2014).

Sin embargo, existen ríos en todo el mundo cuyos regímenes y/o calidad han sido alterados por un periodo de tiempo prolongado. Por ejemplo, el *Mobile River* en EUA ha declarado extintas 16 especies nativas de moluscos como producto de la alteración del régimen (Naiman et al., 2002). El río Tamesis en Inglaterra, muestra alteraciones desde la década de 1960 (Acreman et al., 2014). En México, el curso alto del río Lerma ha sido alterado a niveles alarmantes con contenido de oxígeno disuelto inferior a 0.5 mg/L (Fall et al., 2007). En África, las políticas de regulación de la presa Manantali han incrementado los caudales mínimos del río Senegal, favoreciendo el comercio fluvial y la disponibilidad de agua en estiaje (Bâ, 2016).

En casos donde la magnitud del RHA es superior al RHN, o bien, donde el RHA ha permanecido inferior al RHN por un periodo prolongado, el paradigma del régimen natural de caudales no es aplicable (Arthington, 2012). La modificación de los nichos ecológicos pueden

ser irreversibles (e.g: río Lerma), ya sea por beneficios económicos en la región, por políticas de regulación del caudal o por cambios naturales. El caudal ecológico, queda entonces en función del diseño del régimen por simulación y restringido a respuestas hábitat-caudal-sociedad (O'Brien, 2018). El régimen final y sus implicaciones económicas, sociales y ambientales quedan a juicio y aceptación de los intereses y capacidad de inversión de los *stakeholders* de cada región (Acreman et al., 2014).

4.2. Métodos para cuantificar la alteración hidrológica

La presente investigación retoma dos métodos para efectuar el análisis de alteración hidrológica en las cuencas hidrológicas de la república mexicana. Los aspectos metodológicos son presentados de forma sucinta en las siguientes secciones.

4.2.1. IAH de la NMX-AA-159-SCFI-2012

Este método determina el régimen de volúmenes de agua de manera mensual y anual en estado natural y actual. Su objetivo es identificar si existe, o no, alteración hidrológica a causa de la presencia de infraestructura hidráulica. Su aplicación se extiende a todos los afluentes donde se identifique el grado de afectación del RHA sobre el RHN. Su uso requiere información diaria con al menos 20 años de cada régimen hidrológico (natural y actual o presumiblemente alterado). Si se cuenta con periodos de registro menores a los 20 años, se deberá analizar la representatividad de la serie en años húmedos, medios, secos y muy secos.

El procedimiento por seguir es el siguiente:

- 1) Identificar las corrientes de estudio para análisis de caudales ecológicos y establecer las aportaciones por tributarios y puntos de extracción de caudales (ver Figura 4.1).
- 2) A partir de la estación hidrométrica más representativa de la zona de estudio, determinar el régimen de caudales ordinarios (máximos y mínimos) con base en:
 - Ordenar a partir de la información hidrológica de la serie diaria, los caudales medios mensuales, separando la serie en RHN y RHA.
 - Organizar los caudales mensuales en años naturales para ambas series.
 - Calcular para cada mes del año en la serie re RHN los percentiles 90 y 10 tanto mensuales como anuales.
- 3) Verificar si el RHA, a manera mensual y anual, se encuentra contenido en el régimen de caudal ordinario máximo (90 percentil, P90) y mínimo (10 percentil, P10) sugeridos por el RHN, donde:
 - Si el cumplimiento del RHA es $\geq 50\%$ en magnitud mensual y anual con relación al RHN, se considerará hidrológicamente no alterado.
 - Si el cumplimiento del RHA es $< 50\%$ en su magnitud mensual y anual con relación al RHN, se considerará hidrológicamente alterado.

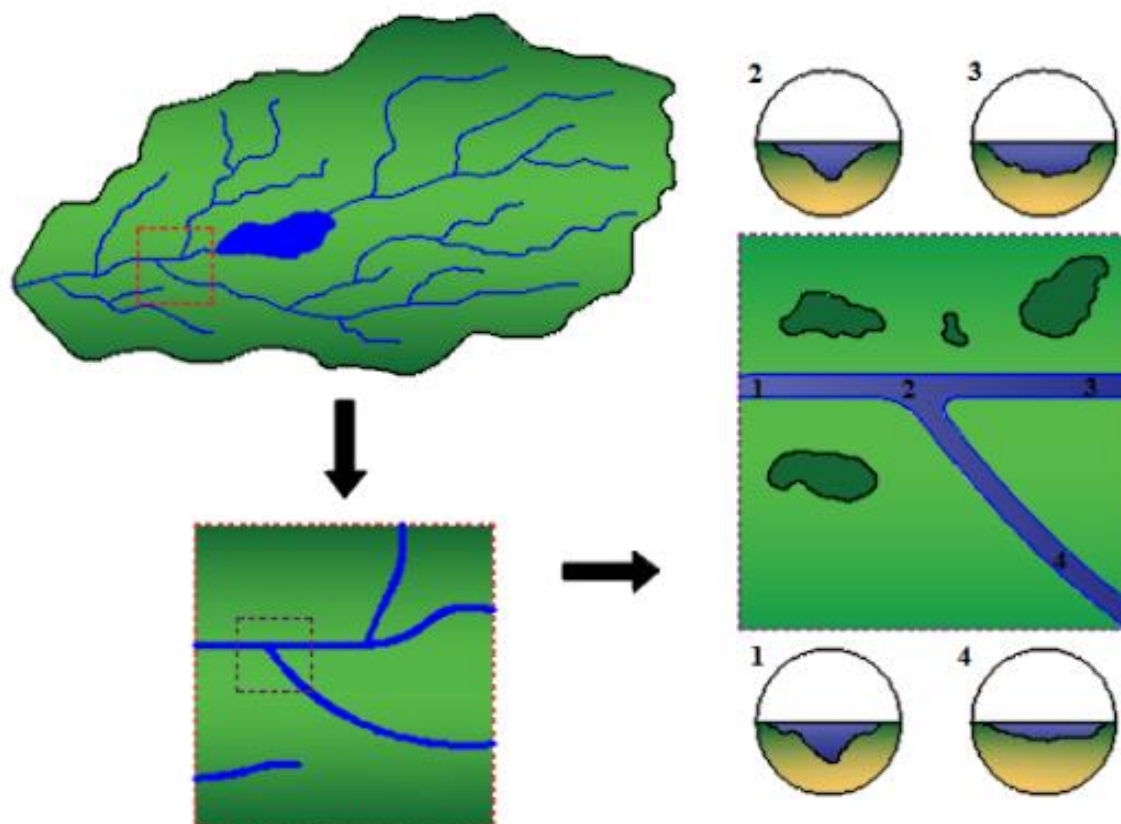


Figura 4.1 Esquema ilustrativo de selección del sitio de estudio dentro de la cuenca (Fuente: adaptado de DOF, 2012).

4.2.2. IAH de IAHRIS

El desarrollo del software de Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS) fue financiado por la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente de España mediante convenio con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y la Universidad Politécnica de Madrid (Martínez y Fernández, 2006). La versión más actualizada presenta un número de veintiún IAHs divididos en tres grupos: valores habituales, valores extremos máximos y valores extremos mínimos (ver Tabla 4.1) que resumen aquellos presentados por Richter et al. (1995). Incluyen consideraciones adicionales al RHN realizadas por Poff et al. (1997) y permiten obtener:

- Parámetros para caracterizar el régimen hidrológico de un río.
- Índices que valoran el grado de alteración del régimen hidrológico.
- Criterios para asignar la condición de masa de agua muy alterada.
- Escenarios de regímenes ambientales de caudales que el usuario puede generar a partir de los patrones de régimen natural.

Tabla 4.1 Parámetros que conforman los IAHRIS.

Componentes del régimen natural		Aspecto	Parámetro
Valores habituales	Valores anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales y mensuales (IAH1 e IAH2).
		Variabilidad	Diferencia entre la aportación mensual máxima y mínima en el año (IAH4).
		Estacionalidad	Mes de máxima y mínima aportación del año (IAH5 e IAH6).
	Valores diarios	Variabilidad	Diferencia entre los caudales medios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90% (IAH3).
Valores extremos	Valores máximos (avenidas)	Magnitud y frecuencia	Media de los máximos caudales diarios anuales (IAH7).
			Caudal generador del lecho (IAH8).
			Caudal de conectividad (IAH9).
			Caudal de la avenida habitual Q5% (IAH10)
	Valores mínimos (sequías)	Variabilidad	Coefficiente de variación de los máximos caudales diarios anuales (IAH11).
			Coefficiente de variación de la serie de avenidas habituales (IAH12).
			Máximo no. de días consecutivos al año con $Q > Q5\%$ (IAH13).
			No. medio de días al mes con $Q > Q5\%$ (IAH14).
		Magnitud y frecuencia	Media de los mínimos caudales diarios anuales (IAH15).
			Caudal de la sequía habitual (Q95%) (IAH16).
			Coefficiente de variación de mínimo caudales diarios anuales (IAH17).
			Coefficiente de variación de la serie de sequías habituales (IAH18).
		Duración	Máximo no. de días consecutivos al año con $Q < Q95\%$. (IAH19).
			No. de días al mes con $Q < Q95\%$ (IAH21).
		Estacionalidad	No. de días al mes con caudal diario nulo (IAH20).

Fuente: adaptada de [Martínez y Fernández \(2006\)](#).

La comunidad científica ofrece una opinión generalizada en la selección de la magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas de cambio del régimen natural:

- Magnitud: determina la disponibilidad general de agua en el ecosistema.
- Frecuencia con la que un evento se produce en un intervalo de tiempo dado: indicador de la variabilidad en el régimen de caudales y condicionante de la dinámica geomorfológica y ecológica y por ende de la biodiversidad.
- Duración o intervalo de tiempo asociado con unas determinadas condiciones de flujo: en situaciones extremas, avenidas y sequías, la duración está íntimamente ligada con los umbrales de resiliencia de las diferentes especies.

- Estacionalidad: o regularidad con la que ese evento acontece en una época determinada del año. Es un aspecto vinculado estrechamente, y en sincronía, con los ciclos de vida de las especies (fluviales, de estuarios y marinas).
- Tasas de cambio: referente a la rapidez con la que se producen los cambios de unas magnitudes a otras, afectando la capacidad de respuesta de la biota.

El método considera una representatividad de años secos, medios y húmedos del 25%, 50% y 25% respectivamente y se divide el registro de datos como sigue:

- Un año será considerado **húmedo** si su aportación en régimen natural es superior a la aportación correspondiente al percentil de excedencia del 25%.
- Un año será considerado **medio** si su aportación anual en régimen natural está comprendida entre las aportaciones correspondientes a los percentiles de excedencia del 25% y 75%.
- Un año será considerado **seco** si su aportación anual en régimen natural es inferior a la aportación correspondiente al percentil de excedencia del 75%.

El percentil de excedencia no proviene de un análisis de frecuencias de caudales, sino de la repetición del número de observaciones y la probabilidad de exceder su frecuencia acumulada. Se emplea la fórmula de probabilidad empírica de Weibull para tal efecto.

$$P = \frac{m}{n + 1} \quad \text{Ec. 4-1}$$

Donde: P es la frecuencia relativa acumulada; m es la posición que ocupa el valor X en la serie de datos ordenada de menor a mayor; n es el número total de datos en la serie.

Los índices parciales para condiciones naturales y alteradas (para los primeros seis índices) están dados según:

$$IAH_{(RHN,RHA)} = 0.25(IAH_i^{Seco}) + 0.50(IAH_i^{Medio}) + 0.25(IAH_i^{Húmedo}) \quad \text{Ec. 4-2}$$

Donde: $I_{(RHN,RHA)}$ es el índice parcial para el RHN y el RHA, (IAH_i^{Seco}) es el valor del índice i para años secos, (IAH_i^{Medio}) es el valor del índice i para años medios e $(IAH_i^{Húmedo})$ es el valor del índice i para años húmedos.

Cada índice mostrado en la Tabla 4.1 es conformado como el cociente del índice del RHA entre el índice del RHN:

$$IAH_i = \frac{IAH_{RHA}}{IAH_{RHN}} \quad \text{Ec. 4-3}$$

Donde: IAH_i es el índice parcial marcado en la Tabla 4.1, IAH_{RHA} es el índice para el RHA e IAH_{RHN} es el índice para el RHN.

Finalmente se tienen tres índices de alteración global (IAG). Uno para los valores habituales, otro para valores extremos máximos y el último para los valores extremos mínimos. Cada uno de los IAG está dado por:

$$IAG_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n a_i^2}{n(n-1)} \quad \text{Ec. 4-4}$$

Donde: IAG_i es el índice de alteración global i, n es el número de índices de alteración que evalúan un aspecto del régimen y a_i =valor que toma el índice $IAH_{iparcial}$

Con el objetivo de ofrecer una valoración no sólo cuantitativa sino también cualitativa del grado de alteración, se proponen cinco niveles o estados de alteración hidrológica, denominados “estatus hidrológicos” (Figura 4.2). Dicha clasificación está basada en las recomendaciones de niveles y asignación de colores recogida en CIS-WFD (2003). Cada índice está acotado entre 0 y 1, correspondiendo a 1 la situación óptima (mínima alteración) y a 0 la más degradada (máxima alteración).

Adoptando una distribución equitativa de las seis clases propuestas, la Tabla 4.2 resume los criterios de representación y asignación de los diferentes estatus hidrológicos deducidos de los índices parciales mediante una ecuación cuadrática.

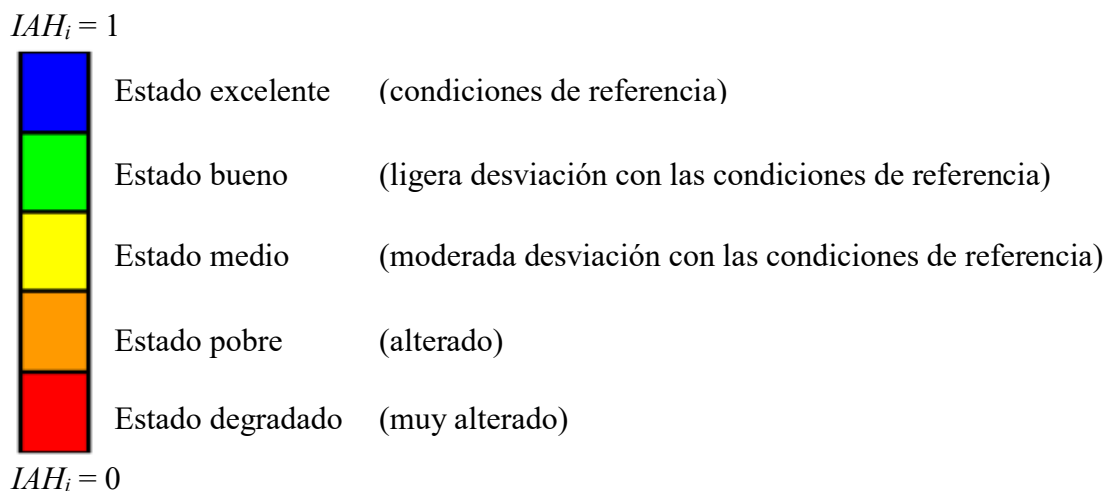


Figura 4.2 Clasificación de estatus hidrológicos. Fuente: adaptada de CIS-WFD (2003).

Tabla 4.2 Clasificación de los estatus hidrológicos para los índices parciales (IAH_i). Fuente: [Martínez y Fernández \(2006\)](#).

Estatus hidrológico de índices parciales (IAH_i)				
Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV	Nivel V
$0.8 < IAH_i \leq 1$	$0.6 < IAH_i \leq 0.8$	$0.4 < IAH_i \leq 0.6$	$0.2 < IAH_i \leq 0.4$	$0 \leq IAH_i \leq 0.2$

Respecto a los índices de alteración global, recordando la relación cuadrática existente entre IAH e IAG (Ec. 4-4) se obtienen los siguientes criterios de representación y asignación del estatus hidrológico para los índices globales:

Tabla 4.3 Clasificación de los estatus hidrológicos para los índices globales (IAG_i). Fuente: [Martínez y Fernández \(2006\)](#).

Estatus hidrológico de índices globales (IAG_i)				
Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV	Nivel V
$0.64 < IAG_i \leq 1$	$0.36 < IAG_i \leq 0.64$	$0.16 < IAG_i \leq 0.36$	$0.04 < IAG_i \leq 0.16$	$0 \leq IAG_i \leq 0.04$

Dado que no existe una ponderación entre los tres índices globales para obtener un sólo valor de alteración, se considera como régimen no alterado si los tres IAG_i son mayores que 0.36. De contar por lo menos con un índice global por debajo de 0.36, se considera el régimen en estado de alteración.

La alteración hidrológica también se presenta cuando la valoración del RHA es superior a la del RHN. En dichos casos, se acepta que las magnitudes del RHA sean superiores a la del RHN siempre y cuando no sean significativas para los ecosistemas dependientes. De esta forma, la estimación de los índices parciales está dada por el inverso de la Ec. 4-3.

La Figura 4.3 muestra un ejemplo hipotético de dos hidrogramas correspondientes a dos valoraciones: i) $RHA < RHN$ con $IAH_i = RHA/RHN$ y ii) $RHA > RHN$ con $IAH_i = RHN/RHA$. Existe un rango de variabilidad donde se acepta $RHA > RHN$. Si el RHA excede dicho rango, comenzará a alejarse de las condiciones naturales con tendencia a alterar cualquiera de los componentes del régimen del río (zona A). El incremento en la magnitud de los caudales modifica el nicho ecológico aguas abajo y, con frecuencia, favorece la introducción de especies invasoras. Contrariamente, dicho incremento puede mejorar el transporte fluvial y la economía de la región. Su implementación depende de los beneficios ecológicos-económicos-sociales cuyas consecuencias deben ser valoradas y aceptadas por su sociedad ([Acreman et al., 2014](#)).

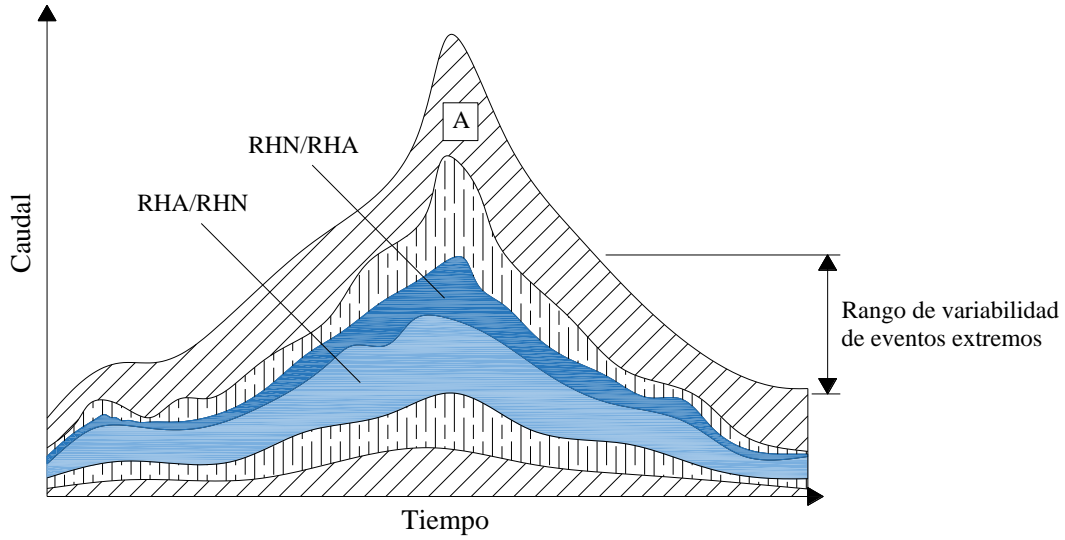


Figura 4.3 Rango de variabilidad de eventos extremos.

Índices de alteración de valores habituales

IAH1: Índice de magnitud de aportaciones anuales.

Evalúa la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la magnitud de las aportaciones anuales con respecto a su valor en régimen natural. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final, está dado por la ponderación de la Ec. 4-2.

$$IAH1^z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{(AA_{añoi})_{RHA}}{(AA_{añoi})_{RHN}} \right]^z \quad \text{Ec. 4-5}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z , $(AA_{añoi})_{RHA}$ es la portación anual en régimen alterado, $(AA_{añoi})_{RHN}$ es la aportación anual en régimen natural y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH2: Índice de magnitud de aportaciones mensuales.

Con el objetivo de evitar las compensaciones que se pueden producir entre los distintos meses del año, cuando se trabaja con valores anuales, se propone este índice que dota con el mismo peso la alteración de cada mes. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ec. 4-2.

$$IAH2^z = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left[\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{(Am_{mesi,añoj})_{RHA}}{(Am_{mesi,añoj})_{RHN}} \right]^z \quad \text{Ec. 4-6}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo Z , $(Am_{mesi,añoj})_{RHA}$ es la aportación mensual correspondiente al mes i del año j en régimen alterado, $(Am_{mesi,añoj})_{RHN}$ es la aportación mensual correspondiente al mes i del año j en régimen natural y Z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH3: Índice de variabilidad habitual.

Evalúa la distorsión que en variabilidad habitual presenta un régimen alterado frente al natural, entendiendo por variabilidad habitual la que prescinde de los valores extremos que se presentan en el año. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ec. 4-2.

$$IAH3^Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(Q_{10} - Q_{90})_{añoi,RHA}}{(Q_{10} - Q_{90})_{añoi,RHN}} \quad \text{Ec. 4-7}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo Z , Q_{10} es el caudal con probabilidad de excedencia del 10% en la curva de duración de caudales del tipo Z , Q_{90} es el caudal con probabilidad de excedencia del 90% en la curva de duración de caudales del tipo Z , los subíndices RHA y RHN hacen referencia al régimen hidrológico alterado y natural respectivamente y Z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH4: Índice de variabilidad extrema.

Evalúa la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la variabilidad extrema de los valores habituales respecto al régimen natural (Figura 4.4). El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ec. 4-2.

$$IAH4^Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{(Am_{máxima} - Am_{mínima})_{añoi,RHA}}{(Am_{máxima} - Am_{mínima})_{añoi,RHN}} \right]^Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{A}{B} \right]^Z \quad \text{Ec. 4-8}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo Z , $(Am_{máxima} - Am_{mínima})_{añoi,RHA}$ es la aportación mensual máxima del año i en régimen alterado (análogamente para $Am_{mínima}$ año i , RHA), $(Am_{máxima} - Am_{mínima})_{añoi,RHN}$ es la aportación mensual máxima del año i en régimen natural (análogamente para $Am_{mínima}$, año i , RHN) y Z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH5: Índice de estacionalidad de máximos.

Evalúa la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la estacionalidad de las aportaciones máximas mensuales naturales. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ec. 4-2.

$$IAH5^z = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\text{número de meses de desfase del máximo})_{año i} \right]^z \quad \text{Ec. 4-9}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z , $(\text{número de meses de desfase del máximo})_{año i}$ es el número de meses de desfase entre el mes de máxima aportación en régimen alterado y el mes de máxima aportación en régimen natural para un año dado y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

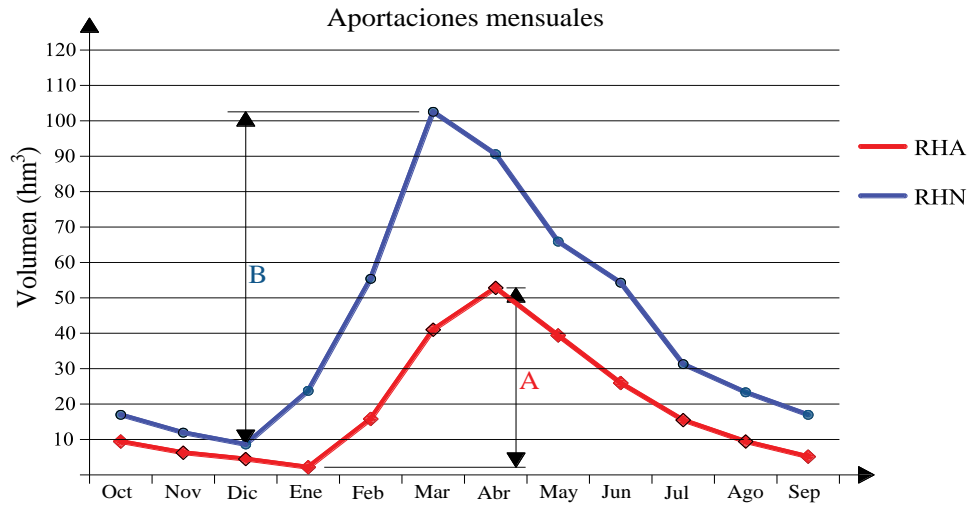


Figura 4.4 Evaluación del índice de variabilidad o de diferencias extremas de un año determinado. A= Aportación mensual máxima-Aportación mensual mínima en régimen alterado. B=Aportación mensual Máxima-Aportación mensual mínima en régimen natural. Fuente: adaptado de [Martínez y Fernández \(2006\)](#).

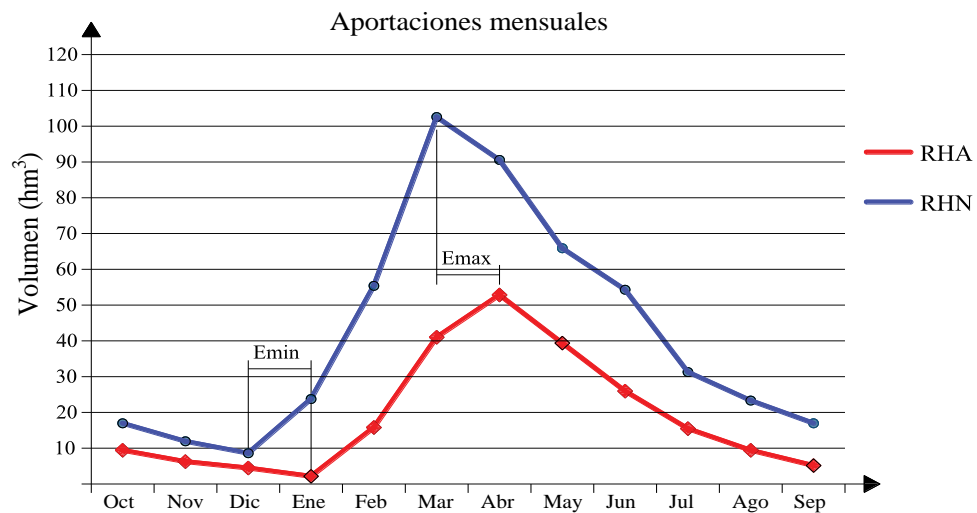


Figura 4.5 Representación gráfica del significado de estacionalidad o desfase temporal para valores máximos y mínimos. Fuente: adaptado de [Martínez y Fernández \(2006\)](#).

IAH6: Índice de estacionalidad de mínimos.

Evalúa la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la estacionalidad de las aportaciones mínimas mensuales naturales. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ec. 4-2.

$$IAH6^z = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\text{número de meses de desfase del mínimo})_{año i} \right]^z \quad \text{Ec. 4-10}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z , $(\text{número de meses de desfase del mínimo})_{año i}$ es el número de meses de desfase entre el mes de mínima aportación en régimen alterado y el mes de mínima aportación en régimen natural para un año dado y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

Índices de alteración de valores extremos máximos**IAH7:** Índice de magnitud de avenidas máximas.

Evalúa la alteración en magnitud de las avenidas máximas tomando como parámetro el valor medio de la serie de máximos caudales medios diarios anuales en RHN y RHA.

$$IAH7 = \frac{(\overline{Qc})_{RHA}}{(\overline{Qc})_{RHN}} \quad \text{Ec. 4-11}$$

Donde: $(\overline{Qc})_{RHA}$ es la media de los máximos caudales medios diarios anuales de la serie disponible en régimen alterado, $(\overline{Qc})_{RHN}$ es la media de los máximos caudales medios diarios anuales de la serie disponible en régimen natural.

IAH8: Índice de magnitud del caudal generador del lecho.

El caudal generador del lecho es representativo de la magnitud y frecuencia de aquellos caudales máximos con especial significado geomorfológico. Hickey y Salas (1995) analizan las alteraciones sobre la fauna, vegetación, bentos y geomorfología como consecuencia de modificaciones en el régimen de avenidas. De todas estas implicaciones ambientales, el significado geomorfológico de los caudales máximos es la más tangible. De esta forma, el caudal generador del lecho está dado por la Ec. 4-12 mientras que el IAH8 queda dado por la Ec. 4-13.

$$Q_{MCO} = (\overline{Qc}) * [0.7 + 0.6 * CV(Qc)] \cong Q_{GL} \quad \text{Ec. 4-12}$$

Donde: Q_{MCO} es el caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria, Q_{GL} es el caudal generador del lecho, \overline{Qc} es la media de la serie de máximos caudales medios diarios anuales y $CV(Qc)$ es el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales.

$$IAH8 = \left(\frac{Q_{GLRHA}}{Q_{GLRHN}} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. 4-13}$$

Donde: Q_{GLRHA} es el caudal generador del lecho correspondiente al régimen alterado y Q_{GLRHN} Caudal Generador del Lecho correspondiente al régimen natural.

IAH9: Índice de magnitud de caudal de conectividad.

El caudal de conectividad (Q_{CONEC}) es representativo de los caudales máximos que garantizan la conexión cauce-llanura de inundación, especialmente ligados con la dinámica de la banda riparia y los ecosistemas dependientes de inundaciones periódicas. El índice, trata de evaluar la magnitud de aquellos caudales implicados en el mantenimiento de la conectividad transversal cauce-llanura de inundación. Dicha conectividad garantiza la accesibilidad y mantenimiento de las condiciones de humedad adecuadas para los diferentes estadios de la biota. Así mismo, estimula el rejuvenecimiento del hábitat ripario, los procesos de sucesión del bosque de ribera y asegura el mantenimiento de la secuencia en tramos meandriformes, el rejuvenecimiento de los canales laterales, etc. (Poff et al., 1997; Richter y Richter 2000; Brizga et al., 2001). La conectividad transversal es también crítica en el mantenimiento de la diversidad y funcionalidad de las comunidades de macroinvertebrados (Collier y Scarsbrook, 2000).

Por lo tanto, el Q_{CONEC} es obtenido como aquel caudal que siendo superior a Q_{GL} , tenga un periodo de retorno doble al de éste.

$$Q_{CONEC} = Q_{(T=2T_{QGL})} \quad \text{Ec. 4-14}$$

Donde: Q_{CONEC} es el caudal de conectividad y $Q_{(T=2T_{QGL})}$ es el caudal cuyo periodo de retorno es el doble del periodo de retorno del caudal generador del lecho. Para tal efecto, se sugiere emplear la distribución de probabilidad Gumbel I (Llamas, 1993).

$$IAH9 = \frac{T_{(Q_{CONEC})RHA}}{T_{(Q_{CONEC})RHN}} \quad \text{Ec. 4-15}$$

Donde: Q_{CONEC} es el caudal de conectividad en régimen natural (caudal que duplica el período de retorno del caudal generador del lecho en dicho régimen), $T_{(Q_{CONEC})RHA}$ es el período de retorno correspondiente al caudal de conectividad en régimen alterado y $T_{(Q_{CONEC})RHN}$ es el período de retorno correspondiente al caudal de conectividad en régimen natural.

IAH10: Índice de magnitud de las avenidas habituales.

Define a la avenida habitual como el caudal con probabilidad de excedencia del 5% ($Q_{5\%}$) de la curva de duración de caudales. Constituye una nueva variable hidrológica que, al representar fenómenos de recurrencia inferior al año, sintetiza múltiples aspectos de funcionalidad biológica de los valores máximos.

$$IAH10 = \frac{Q_{5\%RHA}}{Q_{5\%RHN}} \quad \text{Ec. 4-16}$$

Donde: $Q_{5\%RHA}$ es la avenida habitual en régimen alterado y $Q_{5\%RHN}$ es la avenida habitual en régimen natural.

IAH11: Índice de variabilidad de las avenidas máximas.

Es el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales.

$$IAH11 = \frac{CV(Q_{cRHA})}{CV(Q_{cRHN})} \quad \text{Ec. 4-17}$$

Donde: $CV(Q_{cRHA})$ es el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales correspondiente al régimen alterado y $CV(Q_{cRHN})$ es el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales correspondiente al régimen natural.

IAH12: Índice de variabilidad de las avenidas habituales.

Cuantifica la distorsión en la variabilidad interanual de las avenidas habituales. El índice emplea como estimador el coeficiente de variación de la serie de valores $Q_{5\%}$ de los regímenes natural y alterado.

$$IAH12 = \frac{CV(Q_{5\%RHA})}{CV(Q_{5\%RHN})} \quad \text{Ec. 4-18}$$

Donde: $CV(Q_{5\%RHA})$ es el coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes a la avenida habitual en régimen alterado (serie anual de $Q_{5\%}$) y $CV(Q_{5\%RHN})$ es el coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes a la avenida habitual en régimen natural (serie anual de $Q_{5\%}$).

IAH13: Índice de duración de avenidas.

Caracteriza la duración de las avenidas como el máximo número de días consecutivos que iguala o supera el umbral del $Q_{5\%}$.

$$IAH13 = \frac{(\text{máximo número de días consecutivos con } Q > Q_{5\%RHN})_{RHA}}{(\text{máximo número de días consecutivos con } Q > Q_{5\%RHN})_{RHN}} \quad \text{Ec. 4-19}$$

Donde: $(\text{máximo número de días consecutivos con } Q > Q_{5\%RHN})_{RHA}$ es el máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen alterado, en que se iguala o supera la avenida habitual natural y $(\text{máximo número de días consecutivos con } Q > Q_{5\%RHN})_{RHN}$ es el máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen natural, en que se iguala o supera la avenida habitual natural.

IAH14: Índice de estacionalidad de avenidas.

Se centra en evaluar la afección a la estacionalidad de las avenidas para cada mes del año y calcular posteriormente el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

$$IAH14^{mes\ i} = \begin{cases} 0 & \text{Si } |natural - alterado| > 5 \\ \frac{5 - |natural - alterado|}{5} & \text{Si } |natural - alterado| \leq 5 \end{cases} \quad \text{Ec. 4-20}$$

Donde: *natural* es el número medio de días al mes con $Q > Q_{5\%RHN}$ en régimen natural para el mes considerado y *alterado* es el número medio de días al mes con $Q > Q_{5\%RHN}$ en régimen alterado para el mes considerado.

Índices de alteración de valores extremos mínimos.

IAH15: Índice de magnitud de las sequías extremas.

Estima la alteración en magnitud de las sequías a partir de la relación existente entre el valor medio de las series de caudales diarios mínimos anuales correspondientes al régimen alterado y al régimen natural.

$$IAH15 = \frac{\overline{Qs}_{RHA}}{\overline{Qs}_{RHN}} \quad \text{Ec. 4-21}$$

Donde: \overline{Qs}_{RHA} es la media de los caudales diarios mínimos anuales de la serie disponible en régimen alterado y \overline{Qs}_{RHN} es la media de los caudales diarios mínimos anuales de la serie disponible en régimen natural.

IAH16: Índice de magnitud de las sequías habituales.

Evalúa la alteración en la magnitud de las sequías (caudal con probabilidad de excedencia de 95% de la curva de duración de caudales). Evita trabajar sólo con valores mínimos extremos dado que enmascaran otras situaciones que, siendo menos críticas, son de gran trascendencia ambiental.

$$IAH16 = \frac{Q_{95\% RHA}}{Q_{95\% RHN}} \quad \text{Ec. 4-22}$$

Donde: $Q_{95\% RHA}$ es el caudal (m^3/s) correspondiente a la sequía habitual en régimen alterado y $Q_{95\% RHN}$ es el caudal (m^3/s) correspondiente a la sequía habitual en régimen natural.

IAH17: Índice de variabilidad de las sequías extremas.

Se utiliza como estimador el coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales correspondientes a cada uno de los regímenes.

$$IAH17 = \frac{CV(Q_{sRHA})}{CV(Q_{sRHN})} \quad \text{Ec. 4-23}$$

Donde: $CV(Q_{sRHA})$ coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales correspondiente al régimen alterado y $CV(Q_{sRHN})$ coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales correspondiente al régimen natural.

IAH18: Índice de variabilidad de las sequías habituales.

El índice utiliza como estimador el coeficiente de variación de la serie de valores $Q_{95\%}$ correspondientes a los dos regímenes en estudio.

$$IAH18 = \frac{CV(Q_{95\% RHA})}{CV(Q_{95\% RHN})} \quad \text{Ec. 4-24}$$

Donde: $CV(Q_{95\% RHA})$ es el coeficiente de variación de la serie anual de valores correspondientes a la sequía habitual en régimen alterado (serie anual de $Q_{95\%}$) y $CV(Q_{95\% RHN})$ es el coeficiente de variación de la serie anual de valores correspondientes a la sequía habitual en régimen natural (serie anual de $Q_{95\%}$).

IAH19: Índice de duración de sequías.

Es el máximo número de días consecutivos en que no se alcanza el umbral definido por el valor $Q_{95\%}$. Por consiguiente, la alteración en la duración de sequías se evalúa como cociente entre el valor de este parámetro en régimen alterado y su homólogo en régimen natural.

$$IAH19 = \frac{(\text{máximo número de días consecutivos con } Q < Q_{95\% RHN})_{RHA}}{(\text{máximo número de días consecutivos con } Q < Q_{95\% RHN})_{RHN}} \quad \text{Ec. 4-25}$$

Donde: $(\text{máximo número de días consecutivos con } Q < Q_{95\% RHN})_{RHA}$ es el máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen alterado, en que no se supera la sequía habitual natural y $(\text{máximo número de días consecutivos con } Q < Q_{95\% RHN})_{RHN}$ es el máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen natural, en que se no se supera la sequía habitual natural.

IAH20: Índice de número de días con caudal no nulo.

Evalúa la afección a la duración de los períodos de caudal nulo para cada mes del año y calcular posteriormente el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

$$IAH20^{mes\ i} = \begin{cases} 0 & Si\ |natural - alterado| > 5 \\ \frac{5 - |natural - alterado|}{5} & Si\ |natural - alterado| \leq 5 \end{cases} \quad Ec. 4-26$$

Donde: *natural* es el número medio de días al mes con $Q = 0$ en régimen natural para el mes considerado y *alterado* número medio de días al mes con $Q = 0$ en régimen alterado para el mes considerado.

IAH21: Índice de estacionalidad de sequías.

Evalúa la afección a la estacionalidad de las sequías para cada mes del año y calcular posteriormente el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

$$IAH21^{mes\ i} = \begin{cases} 0 & Si\ |natural - alterado| > 5 \\ \frac{5 - |natural - alterado|}{5} & Si\ |natural - alterado| \leq 5 \end{cases} \quad Ec. 4-27$$

Donde: *natural* es el número medio de días al mes con $Q > Q_{95\%}$ en régimen natural para el mes considerado y *alterado* es el número medio de días al mes con $Q < Q_{95\%}$ en régimen alterado para el mes considerado.

4.3. Evaluación de la alteración hidrológica en México.

El estado ambiental de los ríos en México no ha sido ampliamente estudiado ni presentado de forma estructurada y cuantitativa. Un estudio cualitativo multivariable de la afectación potencial ambiental fue presentado por (Garrido et. al., 2010). En él, se recopiló información espacial cualitativa y cuantitativa de variables como: capacidad de almacenamiento de presas, número total de presas, densidad de presas por cada 100 km², longitud total de infraestructura hídrica, porcentaje de área de vegetación en zona aledaña al río, porcentaje de vegetación por cuenca, porcentaje de área urbana por cuenca y porcentaje de degradación del suelo. El estudio se realizó a través de un análisis por Sistemas de Información Geográfica (SIG, por sus siglas en inglés) y fue retomado por la normatividad vigente Mexicana para establecer objetivos ecológicos en las cuencas del país (DOF, 2012) (Figura 4.6).



Figura 4.6 Mapa de la afectación potencial a la condición ecológica de los sistemas fluviales a nivel de cuenca (Fuente: Garrido et al., 2010).

4.3.1. Materiales y métodos

Los datos hidrométricos se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2017). La información se encuentra organizada en archivos con extensión *.mdb y se dispone por región hidrológica (RH; Figura 4.7) a escala diaria, mensual y anual. Cada archivo cuenta con observaciones de: gastos medios diarios, datos hidrométricos mensuales, datos hidrométricos anuales, gastos instantáneos, sedimentos, lecturas de escala, curvas de gasto y detalles de las curvas de gasto. La Tabla 4.4 muestra las variables y unidades de las bases de datos de BANDAS.

Tabla 4.4 Información contenida en las bases de datos de BANDAS.

Campo	Variable	Unidades
DDXXXXX*.DBF	Gastos medios diarios	m ³ /s
DMXXXXX.DBF	Gastos hidrométricos mensuales	m ³ /s
DAXXXXX.DBF	Gastos hidrométricos anuales	m ³ /s
HDXXXXX.DBF	Gastos instantáneos (hidrograma)	m ³ /s
STXXXXX.DBF	Sedimentos (sedimentograma)	%
LIXXXXX.DBF	Lecturas de escala (limnigrama)	m
ICGXXXXX.DBF	Identificación de curvas de gasto	fecha y h
DCGXXXXX.DBF	Detalle de curvas de gasto	m y m ³ /s

*XXXXX = identificador de la estación



Figura 4.7 Mapa de regiones hidrológicas de México.

El procesamiento de los gastos medios diarios consistió en: ordenar cronológicamente los registros, omitir lecturas repetidas e incluir un valor numérico en los días sin observación registrada. Para tal efecto, se programó un módulo en el lenguaje de cómputo técnico Matlab. Los resultados se almacenaron en archivos de texto (*.txt) y archivos tipo Matlab (*.mat) por región hidrológica (RH) (ver Anexo Digital I, sección DataBaseOrd).

La base de datos ordenada se compone por tres atributos: ‘fecha’, ‘lectura de la variable’ y ‘clave de la estación climática’. Las primeras tres columnas de la matriz de datos se reservan para el atributo ‘fecha’ (año, mes y día de la observación, respectivamente). Cada columna subsecuente corresponde al vector de datos del atributo ‘lectura de la variable’. Se asignó la ‘clave de la estación climática’ como primer dato de cada vector, excepto para las tres primeras columnas (ya que corresponden al atributo ‘fecha’).

El año de inicio de registro corresponde al primer año en el que alguna de las estaciones haya comenzado a registrar datos climáticos. Se asignó el valor de -1 en los días sin caudal registrado. La Tabla 4.5 muestra la integración de la base de datos para los últimos diez días del mes de diciembre del año 1951 de cinco estaciones ubicadas en la RH doce.

Tabla 4.5 Estructura de las bases de datos BANDAS ordenada.

Año	Mes	Día	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5
0	0	0	12012	12014	12020	12022	12023
1951	12	22	1.159	-1	-1	7.18	1.359
1951	12	23	1.009	-1	-1	7.18	1.359
1951	12	24	0.971	-1	-1	7.217	0.94
1951	12	25	1.109	-1	-1	6.337	0.687
1951	12	26	1.049	-1	-1	0	0.171
1951	12	27	1.139	-1	-1	2.117	0.171
1951	12	28	1.079	-1	-1	7.3	0.687
1951	12	29	1.139	-1	-1	7.277	0.687
1951	12	30	1.079	-1	-1	7.217	0.687
1951	12	31	0.889	-1	-1	7.18	0.858

Se procesaron 2,308 estaciones hidrométricas, de las cuales, 813 estaciones (35.22%) se encuentran en operación y 1,495 estaciones (64.78%) suspendidas. El análisis de porosidad de datos se realizó mediante un módulo programado en Matlab (ver Anexo Digital II, sección Códigos, función AvgDB). La Figura 4.8 muestra la intermitencia de los registros hidrométricos a partir de la década de los 80’s.

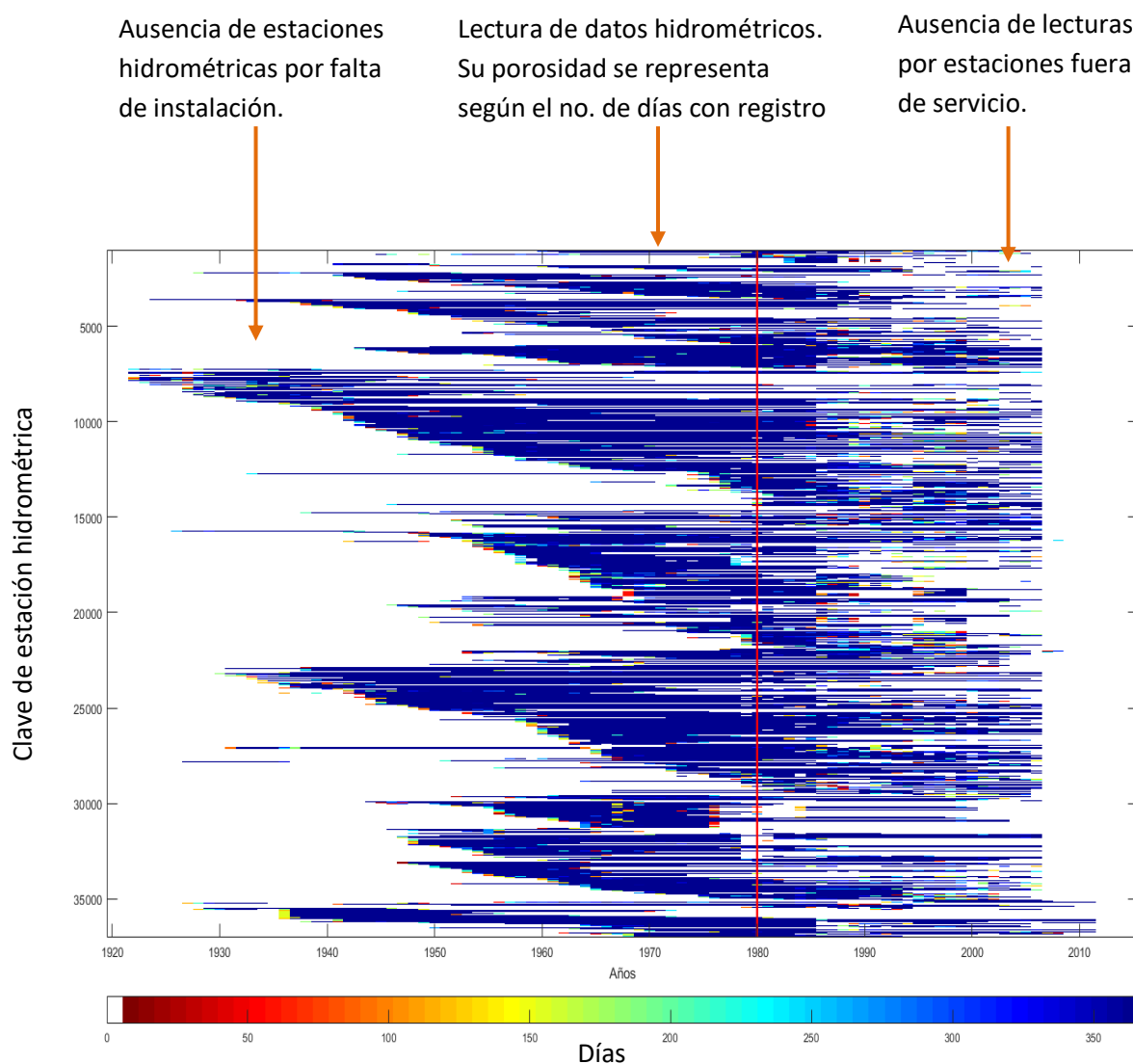


Figura 4.8 Disponibilidad de datos hidrométricos en México (estaciones BANDAS).

El estado de regulación de cuencas hidrográficas se retoma del trabajo realizado por Arévalo-Mejía (2015). El estudio consistió en trazar los partaguas de las cuencas a partir de la estación hidrométrica. La información relativa a las obras de regulación de caudal en México (4,534 obras entre presas y bordos) fue extraída del Sistema de Seguridad de Presas (SSP) de la CONAGUA (CONAGUA, 2016). Se relacionaron las obras de regulación con las cuencas para identificar aquellas no reguladas (Figura 4.9). Se extrajo la fecha de construcción de la obra de la base de datos del SSP. Se consideró la fecha de construcción de la obra más antigua en las cuencas que cuentan con más de una obra de regulación. Los resultados muestran 450 cuencas no reguladas en el territorio nacional (Figura 4.10) y 87 cuencas reguladas cuyo periodo de registro natural es superior a 10 años. El detalle de las cuencas de la región centro, este y sureste mexicano se muestra en la Figura 4.11.

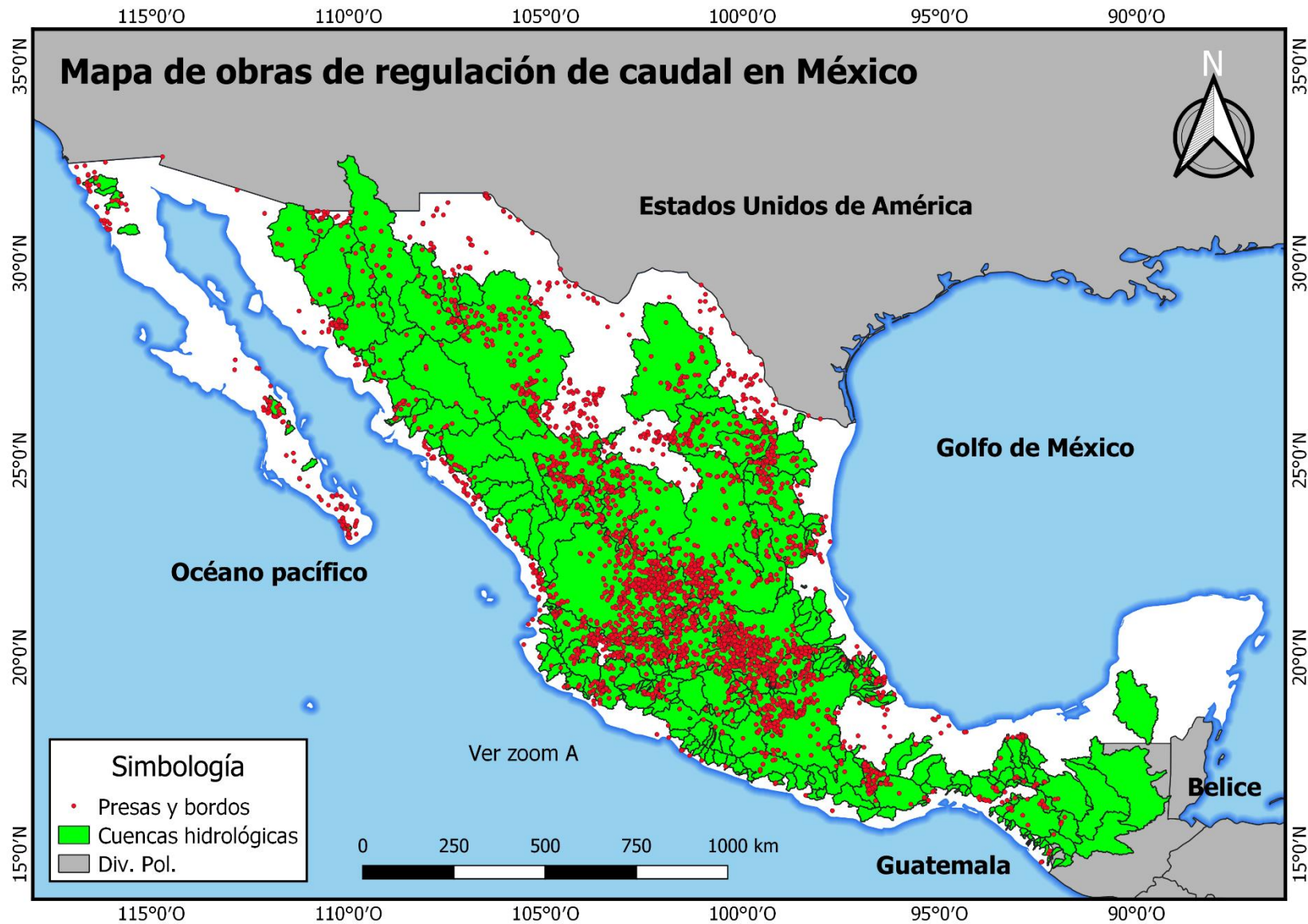
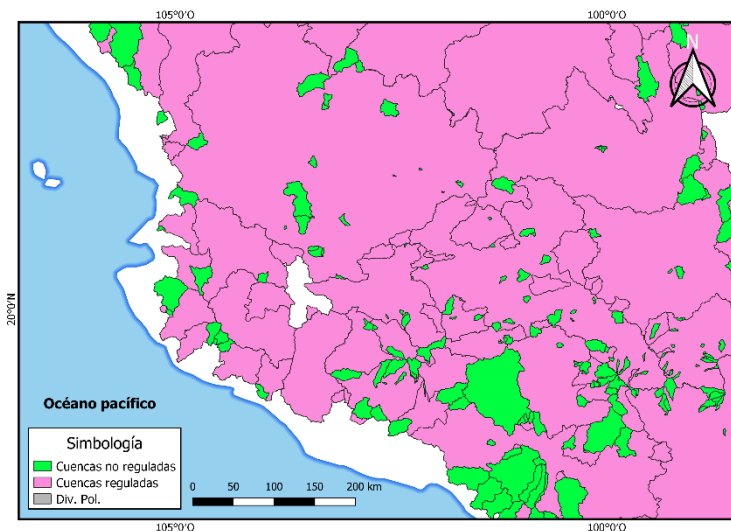


Figura 4.9 Mapa de la distribución espacial de obras de regulación y cuencas hidrográficas. Fuente: adaptada de [Arévalo-Mejía \(2015\)](#).



Figura 4.10 Mapa de relación de cuencas reguladas y no reguladas. Fuente: adaptada de [Arévalo-Mejía \(2015\)](#).

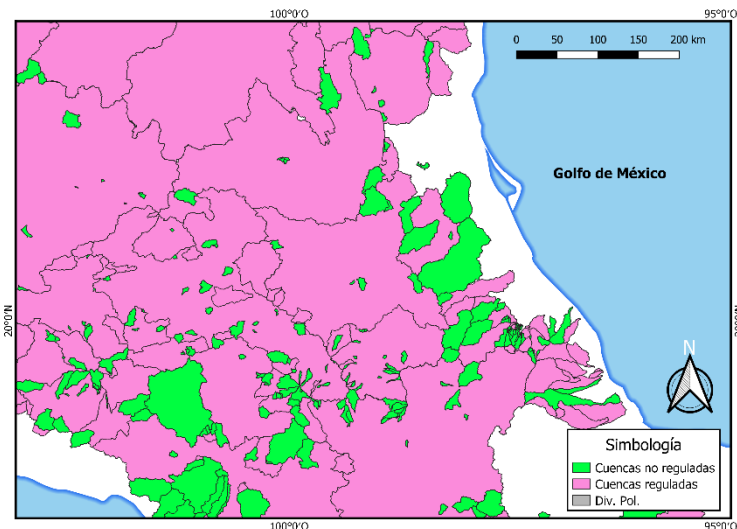


Zoom A: Cuencas pertenecientes al centro y oeste de México. Las microcuencas de la zona centro se concentran, en su mayoría, en los cursos altos de tributarios de ríos principales como, por ejemplo, el río Lerma.

Las cuencas de esta región comenzaron a ser reguladas, en promedio, desde mediados de la década de los 70's.

Zoom B: Cuencas pertenecientes al centro y este de México. Las microcuencas de la zona este presentan una localización similar a las de la zona centro: cursos altos de ríos principales.

Las cuencas de esta región comenzaron a ser reguladas, en promedio, desde inicios de la década de los 80's.



Zoom C: Cuencas pertenecientes al sureste de México. Estas cuencas se concentran, en su mayoría, en zonas costeras. Tabasco y la península de Yucatán son zonas de humedales.

Las cuencas de esta región comenzaron a ser reguladas, en promedio, desde mediados de la década de los 80's.

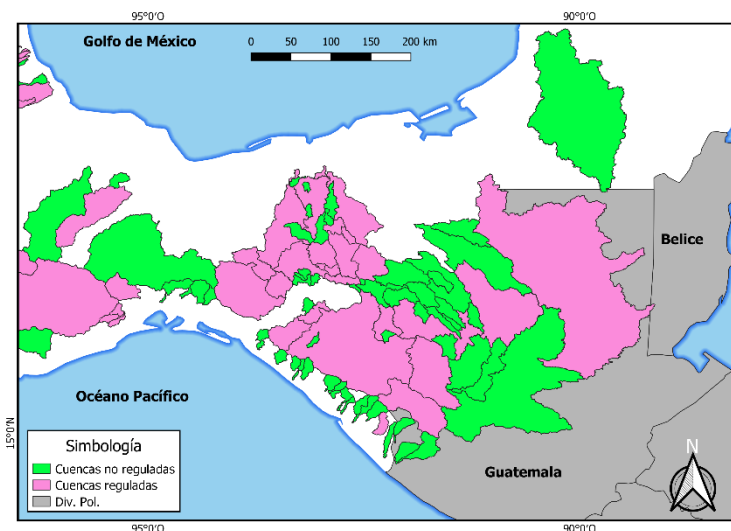


Figura 4.11 Detalle de la Figura 4.10.

Las fechas de construcción de las obras de regulación permitieron dividir la serie de caudales en una parte ‘natural’ y otra presuntamente ‘alterada’. Se estimaron 81 parámetros hidrométricos para cuantificar y cualificar el estado de alteración en cada año de registro (ver Tabla 4.6). En ausencia de alguna obra, la serie se dividió en la mediana o con respecto a algún año un cambio significativo en el escurrimiento pudo ser reconocido. Es importante señalar que un cauce regulado no implica necesariamente un estado alterado con impacto significativo, es decir, una regulación adecuada del cauce puede preservar el estado del hábitat. De esta forma, los índices de alteración hidrológica coadyuvan a confirmar el estado en cuestión.

Tabla 4.6 Parámetros hidrológicos requeridos por los índices de IAHRIS.

Descripción del parámetro	Unidades	No. de parámetros/año
Caudales medios mensuales.	m ³ /s	12
Caudales mínimos para 1, 3, 7, 15 y 30 días consecutivos por medias móviles.	m ³ /s	5
Caudales máximos para 1, 3, 7, 15 y 30 días consecutivos por medias móviles.	m ³ /s	5
No. de días con caudal diario igual a 0 m ³ /s.	días	1
Caudal mínimo anual.	m ³ /s	1
Fecha juliana del caudal mínimo anual (en caso de repetirse la lectura, se considera la primera fecha en la que se registró).	-----	3
Posición del caudal mínimo anual dentro de la serie.	-----	1
Caudal máximo anual.	m ³ /s	1
Fecha juliana del caudal máximo anual (en caso de repetirse la lectura, se considera la primera fecha en la que se registró).	-----	3
Posición del caudal máximo dentro de la serie anual.	-----	1
Número de pulsos bajos, la media en días y la duración máxima de éstos.	días	3
Número de pulsos altos, la media en días y la duración máxima de éstos.	días	3
Caudales mínimos mensuales.	m ³ /s	12
Caudales máximos mensuales.	m ³ /s	12
Magnitud de las aportaciones mensuales.	hm ³ /s	12
Magnitud de la aportación anual.	hm ³ /s	1
Caudales con probabilidad de excedencia de 5%, 10%, 90% y 95%, obtenidos de la curva de duración de caudales por año.	m ³ /s	4
Caudal generador del lecho.	m ³ /s	1
Suma de parámetros	-----	81

Por otro lado, el escurrimiento puede ser visto como un proceso natural de agregación. Por ello, en subcuencas receptoras de un régimen regulado, se separó la serie de caudales en el año de construcción de la obra más antigua aguas arriba. Sin embargo, fue común encontrar estaciones hidrométricas que comenzaron a registrar el caudal años después de la construcción de alguna presa. En dichos casos, el estatus de su régimen depende de la valoración de las cuencas vertientes. No obstante, la evaluación de su alteración permitió identificar cambios en las políticas de regulación de las presas y bordos. Así mismo, se identificó que una cuenca vertedora aguas arriba en estado de alteración, modifica el cauce de la cuenca receptora y sus efectos pueden tardar de 3 a 4 años para visualizarse en los hidrogramas.

4.3.2. Resultados del análisis de alteración hidrológica

El análisis fue realizado por medio de la herramienta informática Hydra-Eflow ([Arévalo-Mejía et al., 2018](#)) para las cuencas del país. Se realizó por región hidrológica aplicando los dos métodos descritos en la sección 4.2. Se aprecia una diferencia notoria en el número de cuencas clasificadas como alteradas y no alteradas según el método aplicado (Figura 4.12). El método sugerido en la normatividad mexicana vigente muestra una mayor cantidad de cuencas no alteradas (281) que el método de IAHRIS (232). El contraste sugiere que evaluar el estado de alteración en función de percentiles mensuales y porcentajes de cumplimiento mensuales y anuales, presenta una mayor flexibilidad, es decir más laxa, en la clasificación que los índices IAHRIS.

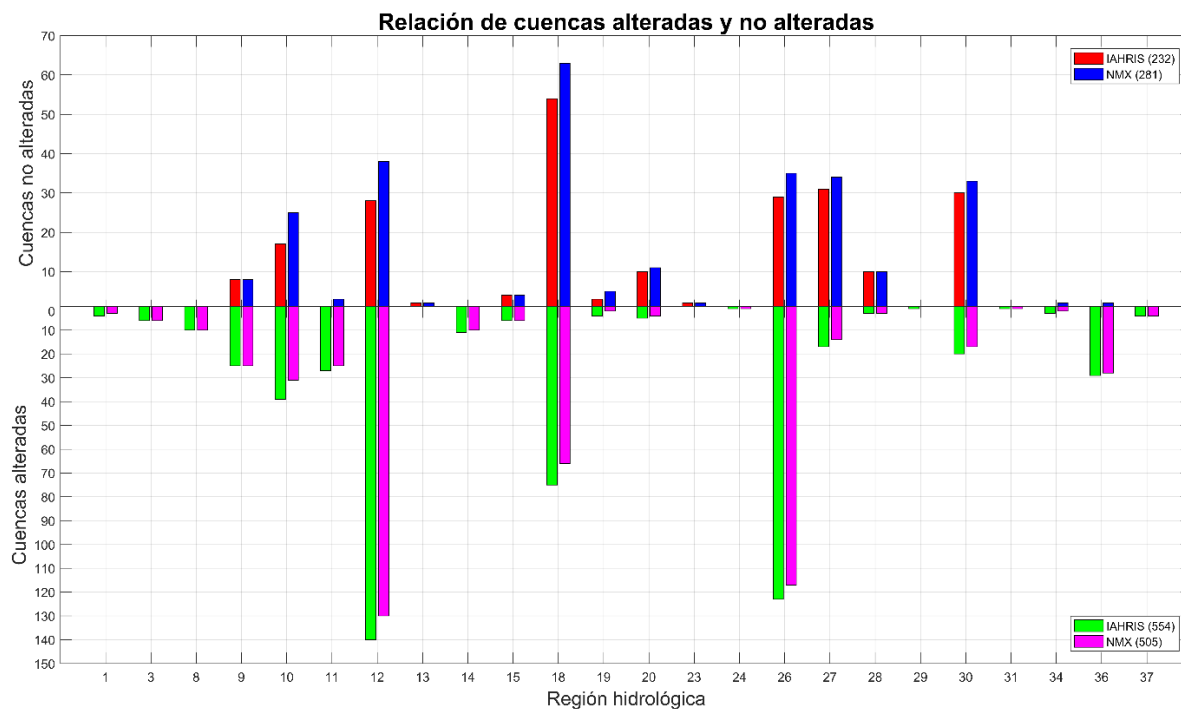


Figura 4.12 Relación del número de cuencas alteradas y no alteradas por región hidrológica.

De la Figura 4.12 se observa que las regiones con mayor cantidad de cuencas alteradas son: Sonora Sur (RH9), Presidio-San Pedro (RH11), Lerma-Santiago (RH12), Río Ameca (RH14), Balsas (RH18), Pánuco (RH26), y Nazas-Aguanaval (RH36). Este grupo de cuencas es importante para el país, ya que en ellas se concentra más del 63% de la población nacional; gran parte de la producción industrial, minera y agrícola (CONAGUA, 2017). Dentro de estas regiones se identificaron cuencas alteradas hidrológicamente que no presentan ningún tipo de regulación (e.g: estación hidrométrica 12374, La “Y”). La fuente de su alteración deberá ser investigada ya que no puede ser atribuida a la presencia de presas y/o bordos. Lo anterior indica que existen factores, adicionales a la presencia de infraestructura hidráulica, que modifican el régimen de los ríos en México.

En contraste, las regiones hidrológicas Costa Chica de Guerrero (RH20) y Papaloapan (RH28) cuentan con un mayor número de cuencas no alteradas. Por otro lado, la región Balsas (RH18) cuenta con la mayor cantidad de cuencas no alteradas del país. Sin embargo, el estado hidrológico no alterado, no implica necesariamente la no degradación del hábitat. Por ejemplo, la presencia de presas y bordos seccionan comunidades de plantas y peces, modifican la morfología de los ríos, alteran parámetros fisicoquímicos del agua y retienen nutrientes en los sedimentos. Por esta razón, es necesario realizar un análisis inclusivo de las especies riparias presentes (Capítulo VII: Análisis biológico).

Los índices de alteración IAHRIS realizan un análisis estadístico más detallado y toman en cuenta las posibles variaciones estacionales en el régimen del río. Además, permiten clasificar cuantitativa y cualitativamente las cuencas. Así, se facilita la labor de identificar cuencas propensas a la rehabilitación, es decir, aquellas que sólo cuentan con algún índice global por debajo del estado bueno ($IAH_i > 0.60$).

Con los resultados de los índices IAHRIS, se clasificaron las cuencas analizadas en cuatro grupos: alteradas en valores medios, alteradas en valores máximos, alteradas en valores mínimos y cuencas inconclusas. El estado inconcluso se debe, principalmente, a la escasa información en el registro histórico de caudales en ciertas estaciones hidrométricas. De esta forma, quedan omitidos los resultados de las regiones: B.C. Centro-Oeste (RH2), B.C. Noreste (RH4), B.C. Centro-Este (RH5), B.C. Sureste (RH6), Río Colorado (RH7), Armería-Coahuayana (RH16), Costa de Michoacán (RH17), Costa de Oaxaca (RH21), Tehuantepec (RH22), San Fernando Soto La Marina (RH25), Coatzacoalcos (RH29), Yucatán Oeste (RH31), Yucatán Norte (RH32), Yucatán Este (RH33) y Mapimí (RH35). Los grupos de cuencas se describen de forma sucinta en los párrafos siguientes.

Cuencas no alteradas: se identificaron 232 cuencas en estado de no alteración. Su distribución es homogénea dentro del país con una mayor concentración en los tributarios de los ríos: Balsas, Papagayo, Verde, Pánuco y Grijalva. También se reconocieron cuencas no alteradas en los cursos altos de los ríos: Conchos, Papaloapan y Coatzacoalcos (Figura 4.13; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas alteradas: 554 cuencas fueron identificadas en estado de alteración. La mayoría se concentran en la zona centro-oeste de México. Las zonas urbanas constituyen uno de los principales factores de alteración en los regímenes de los ríos. Dentro de los ríos con alteración hidrológica, en sus cursos bajos, se encuentran: Sonora, Yaqui, Mayo, Fuerte, Sinaloa, San Lorenzo, Baluarte, Lerma, Balsas, Grijalva y Candelaria (Figura 4.14; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas inconclusas: 528 cuencas mostraron resultados inconclusos. La mayor parte de estas cuencas cuentan con periodos de registro inferiores a los 10 años. Este tipo de cuencas se concentran la zona centro y noreste del país (Figura 4.15; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas alteradas en valores habituales: se obtuvieron 181 cuencas con alteración hidrológica por modificaciones en los valores habituales de sus regímenes. El 83% de estas se concentran en la costa oeste de México. En esta clasificación se encuentran los cursos bajos de los ríos: Sonora, Yaqui, Mayo, Fuerte, Lerma y Candelaria (Figura 4.16; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas alteradas en valores extremos máximos: el análisis mostró 232 cuencas con alteraciones en los valores extremos máximos en sus cauces. Se obtuvo un incremento significativo en la zona centro-oeste mientras que la zona noroeste presentó una reducción en la magnitud de sus avenidas. Los ríos dentro de esta categoría son: Sonora, Yaqui, Mayo, Fuerte y Lerma (Figura 4.17; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas alteradas en valores extremos mínimos: se identificaron 395 cuencas con problemas en sus valores mínimos. El 91% se encuentran reguladas. Adicionalmente, se observó un incremento en su magnitud en la zona centro-oeste. En contraste, la zona noroeste presentó un incremento en la duración de caudales nulos. Los ríos identificados son: Sonora, Yaqui, Mayo, Fuerte, Lerma y Candelaria (Figura 4.18; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas completamente alteradas: 106 cuencas se encuentran en condiciones completamente alteradas, es decir, con alteraciones en sus valores habituales, extremos máximos y extremos mínimos. Principales ríos alterados: Lerma, Sinaloa, Mayo, San Lorenzo y Candelaria (Figura 4.21; ver detalle por cuenca en anexo digital).

Cuencas susceptibles a rehabilitación: 17 cuencas sólo se encuentran alteradas en sus valores habituales. Se observó que la alteración hidrológica puede demorar de 4 a 5 años en manifestarse y/o visualizarse. Por tal razón, se propone un periodo de rehabilitación de, por lo menos, el doble del tiempo que toma la alteración en manifestarse, es decir, de 8 a 10 años para el corto plazo (Figura 4.20; ver detalle por cuenca en anexo digital).

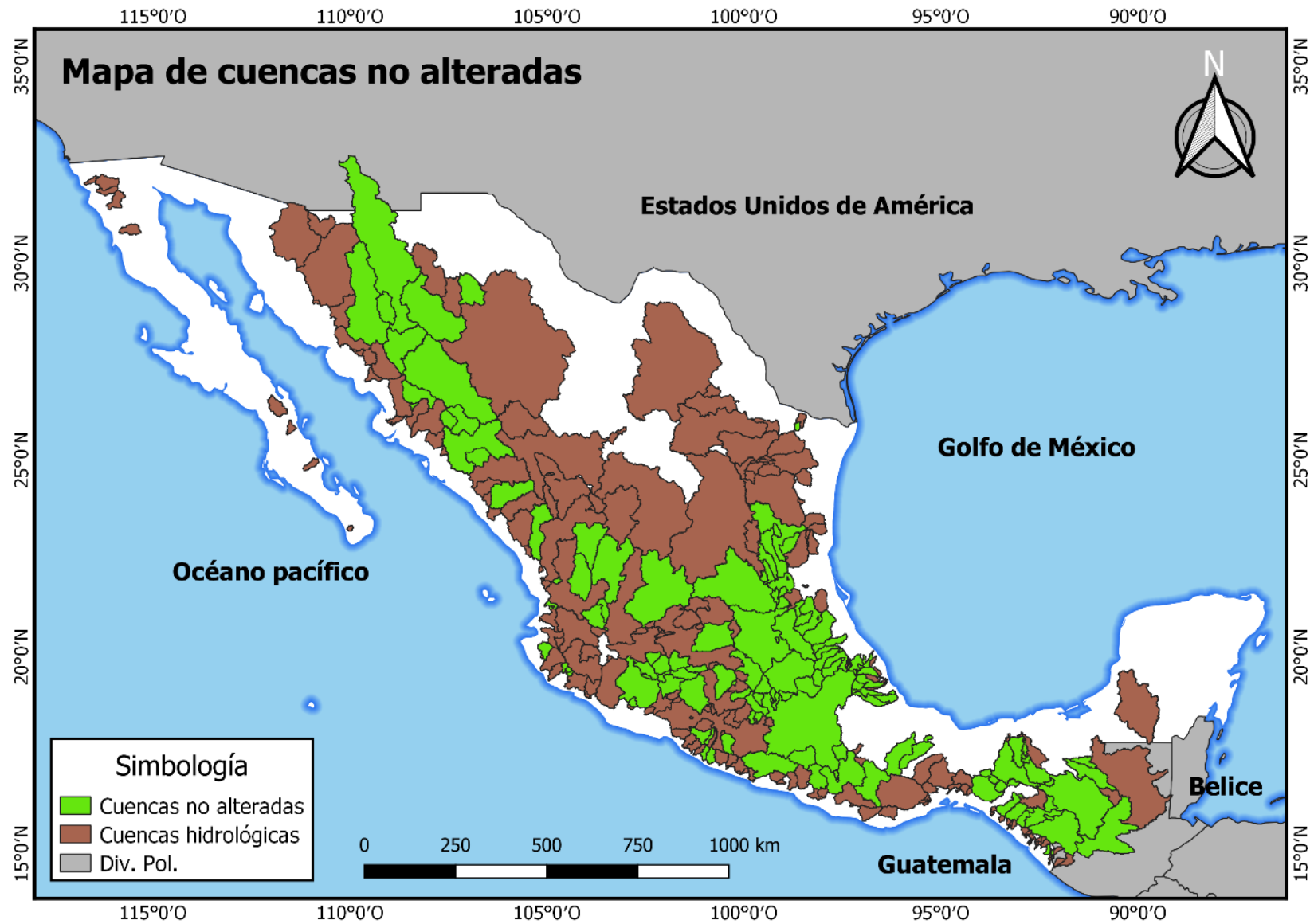


Figura 4.13 Mapa de cuencas no alteradas.

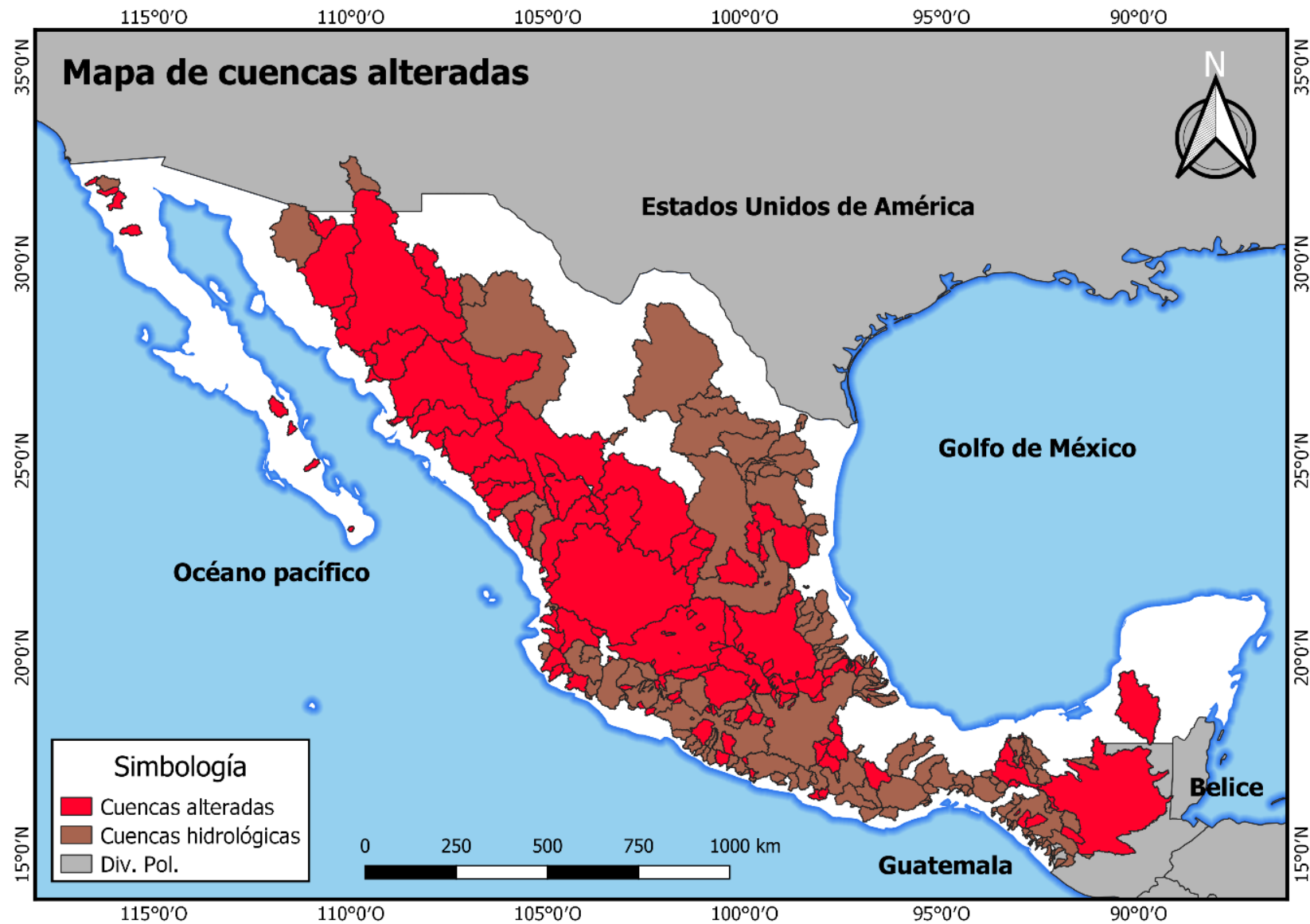


Figura 4.14 Mapa de cuencas alteradas.

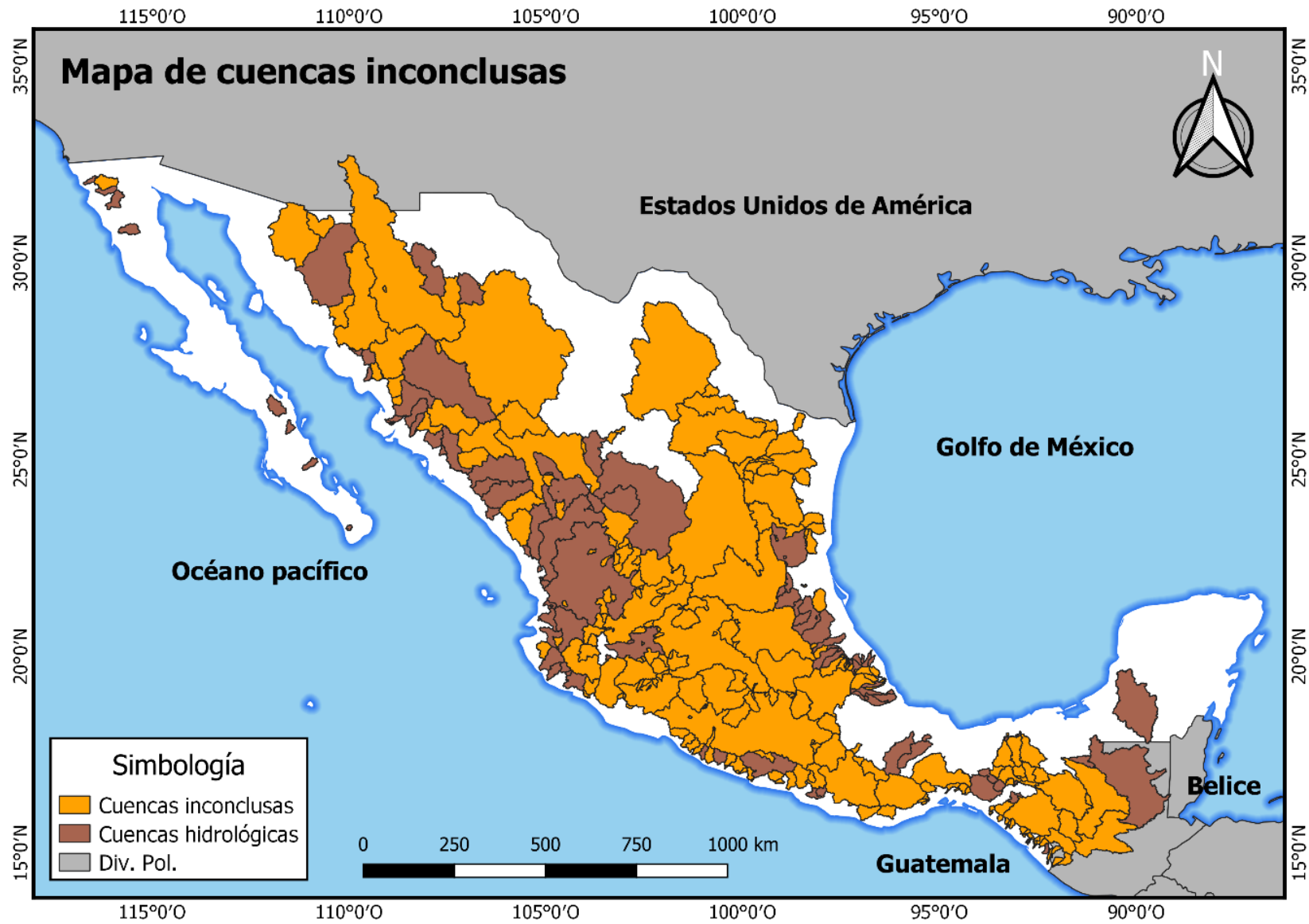


Figura 4.15 Mapa de cuencas inconclusas.

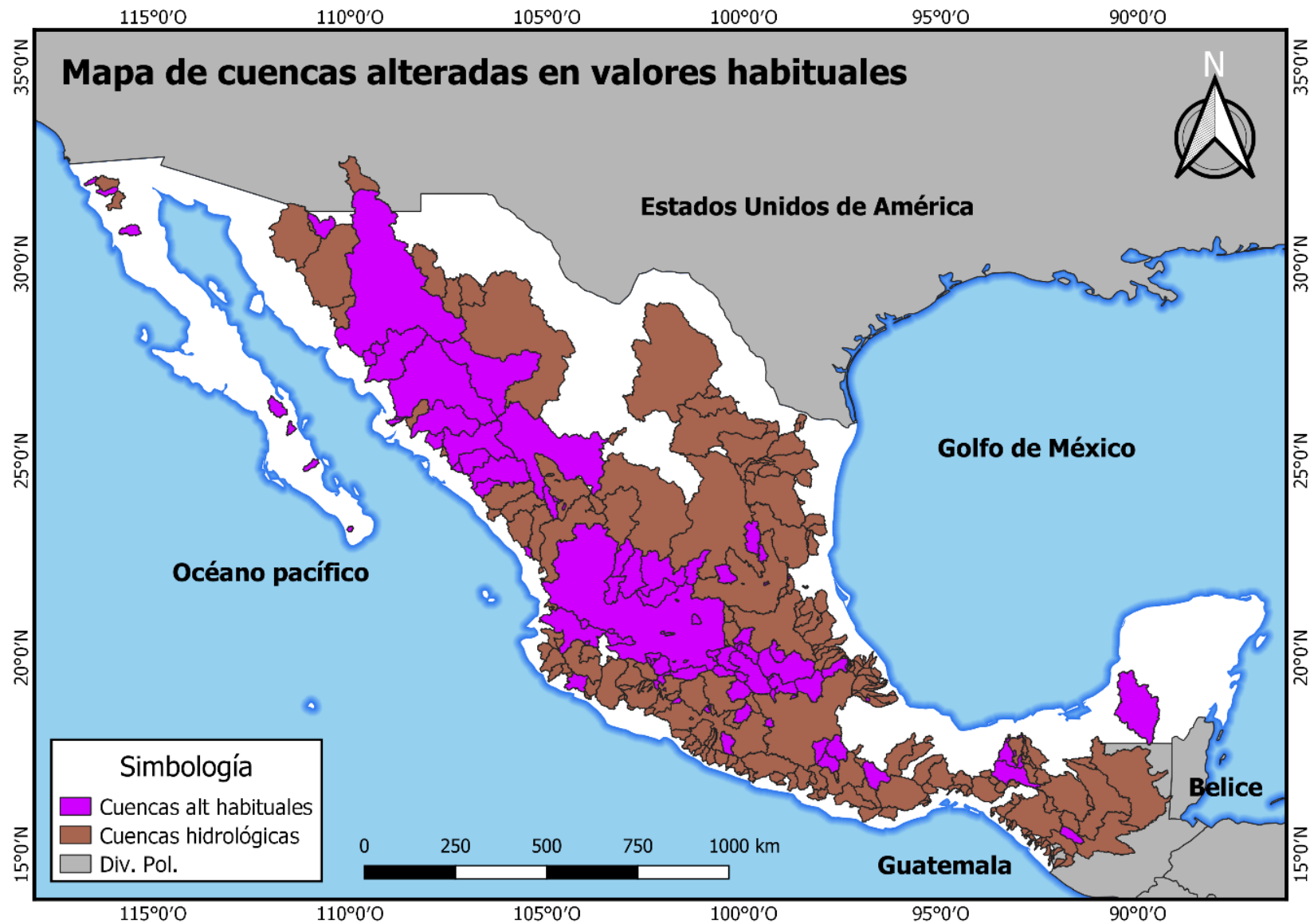


Figura 4.16 Mapa de cuencas alteradas en valores habituales.

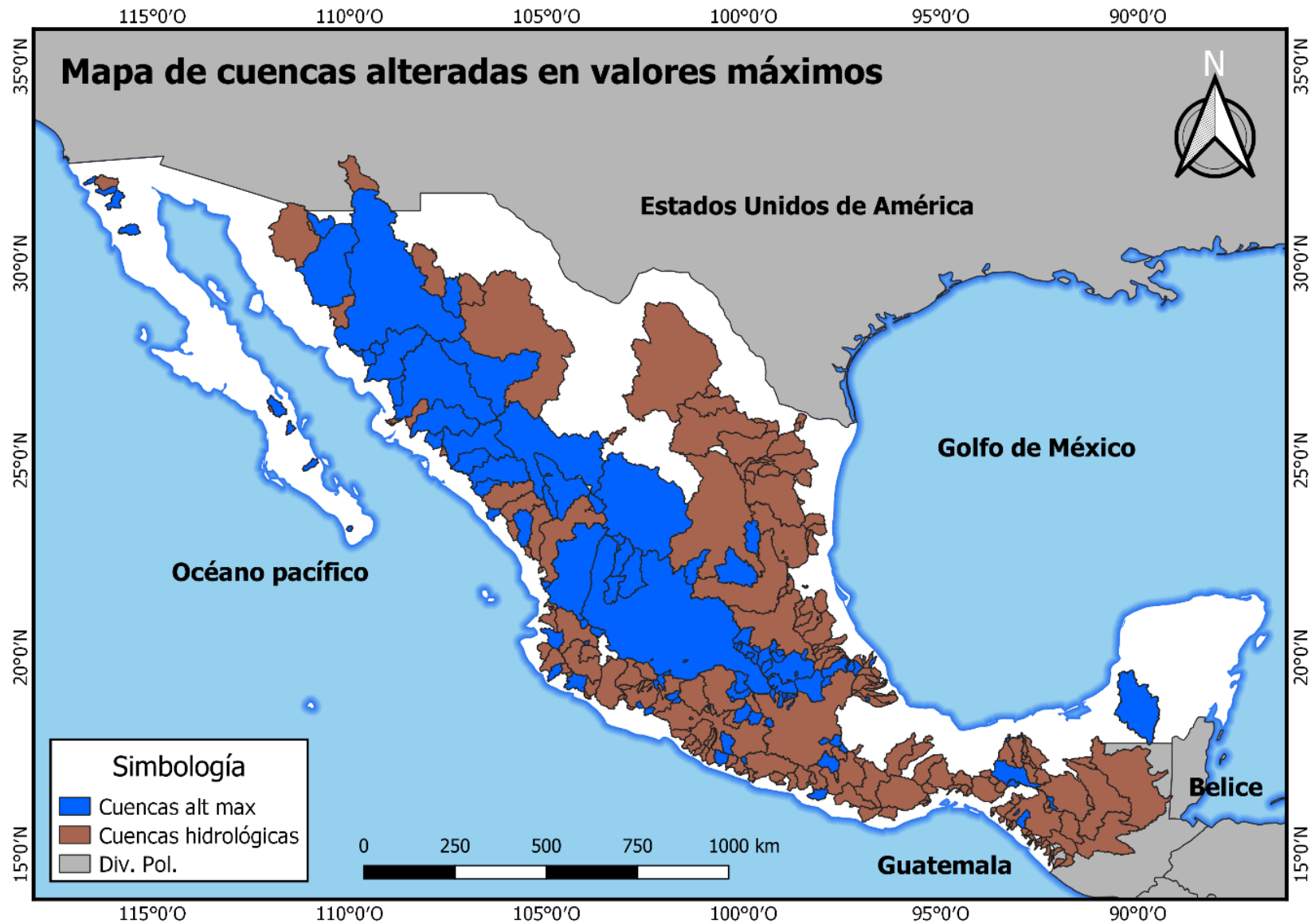


Figura 4.17 Mapa de cuencas alteradas en valores extremos máximos.

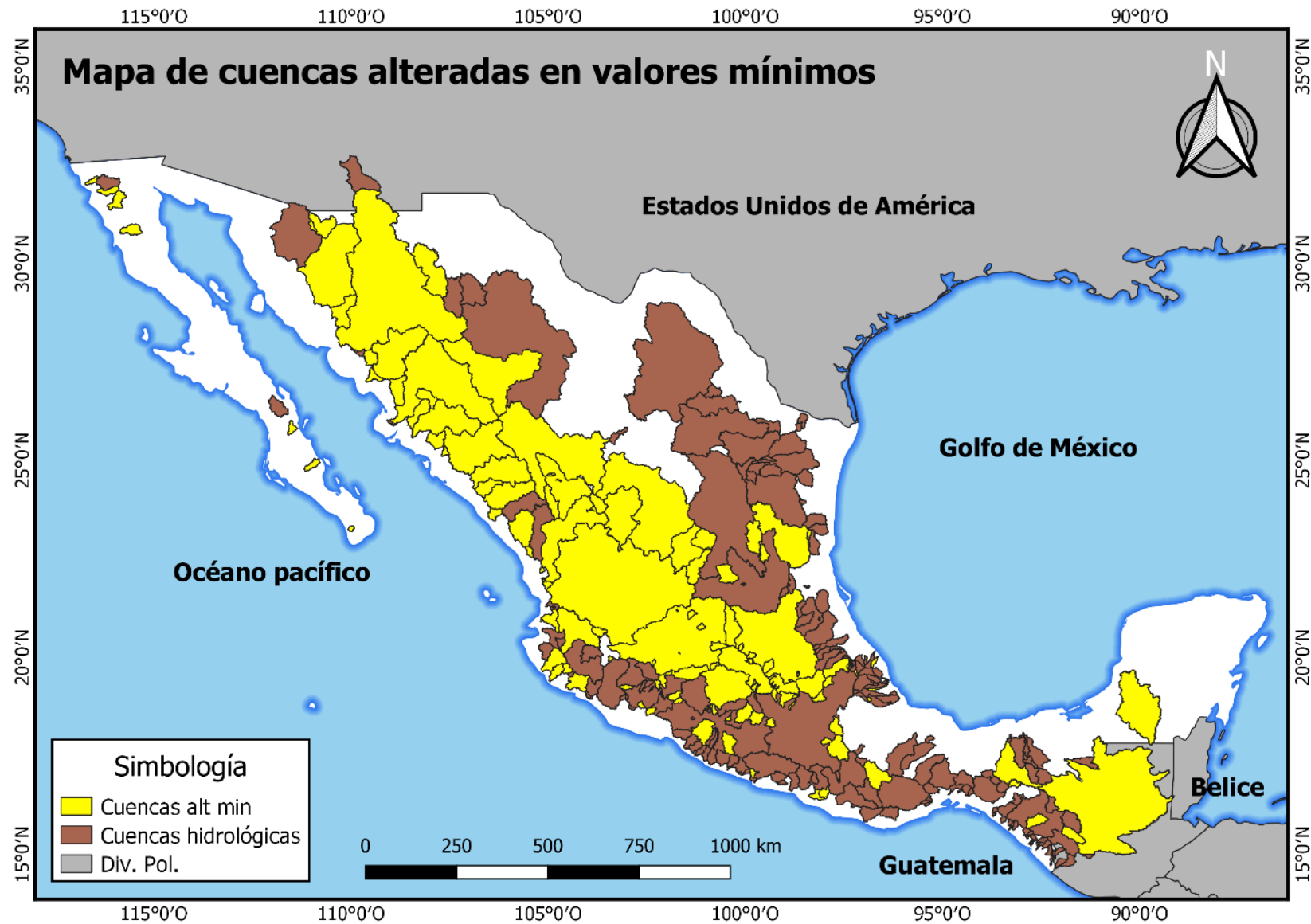


Figura 4.18 Mapa de cuencas alteradas en valores extremos mínimos.

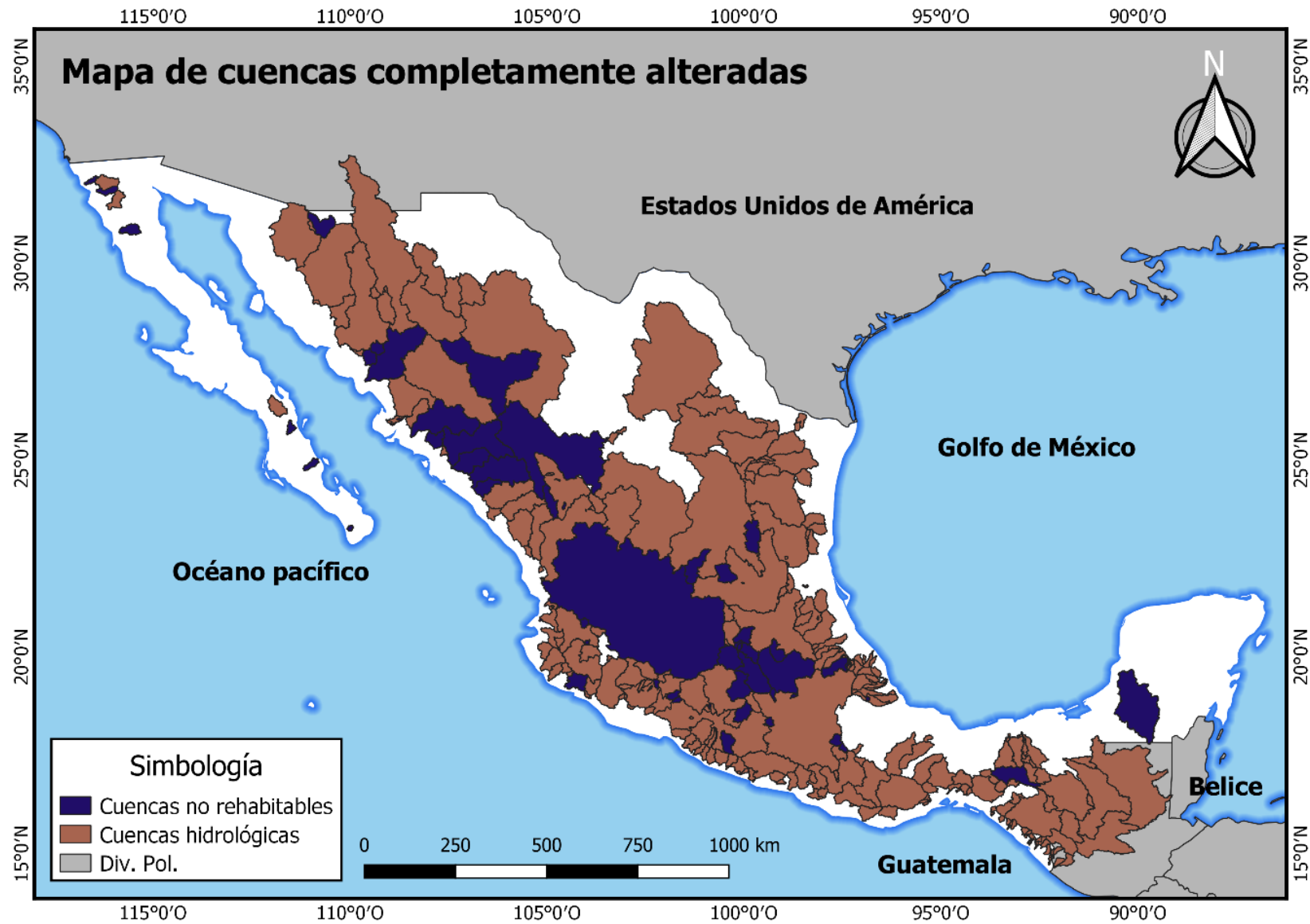


Figura 4.19 Mapa de cuencas completamente alteradas.

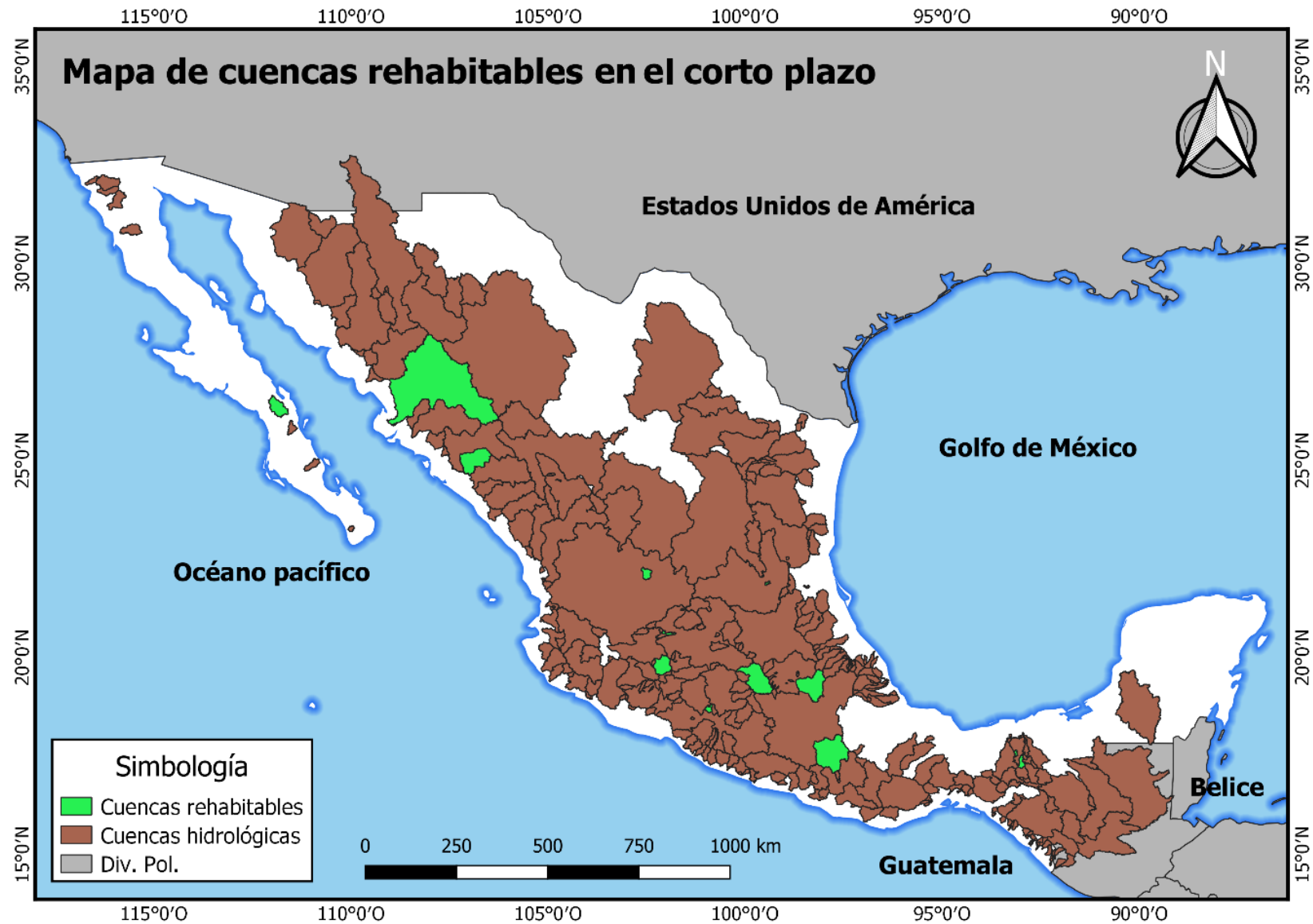


Figura 4.20 Mapa de cuencas rehabilitables en el corto plazo.

A continuación, se describen los resultados obtenidos por IAHG. La media de cada IAH parcial se muestra en la Tabla 4.7 por región hidrológica.

Índice de Alteración Global de valores habituales (IAHG1): los resultados revelan que más del 50% de las cuencas para las cuales fue posible obtener resultados, presentan alteraciones en la magnitud de sus valores medios (IAH2). Siete RH muestran alteraciones en la estacionalidad de sus valores habituales mínimos (IAH6) que, en promedio, oscila entre 1 a 2 meses. La región hidrológica Yucatán Oeste (RH31) presenta el caso más crítico de desfase o bien, su resultado no se pudo estimar confiablemente.

Índice de Alteración Global de valores extremos máximos (IAHG2): de la Tabla 4.7 se observa que todas las RH presentan alteraciones en la magnitud del caudal de conectividad (IAH9). Este resultado implica severas consecuencias para los hábitats riparios en México, ya que al perder la conectividad longitudinal se corre el riesgo de seccionar transversalmente los cauces mexicanos. El aislamiento de comunidades de peces, la introducción de vegetación al río, la disminución del volumen infiltrado y la introducción de especies endémicas son ejemplos de las consecuencias en el hábitat causados por una conectividad longitudinal o transversal deficiente.

Por otro lado, el 82% de las regiones hidrológicas muestran, en promedio, un desfase de los caudales máximos anuales que varía de 1 a 2 meses. Las regiones hidrológicas B.C. Noroeste (RH1) y Bravo-Conchos (RH24) muestran un desfase de los caudales máximos anuales hasta por 3 meses en promedio. Los efectos de estas alteraciones se ven reflejados en la prolongación de la duración de las sequías. Así mismo, impacta en la producción agrícola de las regiones. Estos resultados confirman las revelaciones de Paredes-Tavares et al. (2018) quienes mostraron un desfase en precipitación en la cuenca del Río Bravo (perteneciente a la RH24).

Índice de Alteración Global de valores extremos mínimos (IAHG3): los valores extremos mínimos son los que han mostrado mayor incidencia de alteración. Los resultados revelan que más del 50% de las regiones hidrológicas presentan alteraciones en la magnitud de los caudales mínimos anuales (IAH15) siendo las regiones B.C. Noroeste (RH1), Río Ameca (RH14) y Costa de Jalisco (RH15) las que muestran mayor severidad de alteración. El 40% de las RH muestran alteración en la magnitud de las sequías habituales (IAH16) siendo el norte y la costa oeste mexicana las áreas de mayor afectación (regiones B.C. Noroeste (RH1), Presidio-San Pedro (RH11), Río Ameca (RH14), Nazas-Aguanaval (RH36) y El Salado (RH37)).

Por otro lado, la variabilidad de las sequías extremas (IAH17) está alterada en 17 regiones hidrológicas del país. Las RH de mayor afectación son: Sonora Norte (RH8), Sonora Sur (RH9), Sinaloa (RH10), Presidio-San Pedro (RH11), Lerma-Santiago (RH12), Río Ameca (RH14), Costa de Jalisco (RH15), Costa Grande de Guerrero (RH19), Costa de Chiapas (RH23), Cuencas Cerradas del Norte (RH34), Nazas-Aguanaval (RH36) y El Salado (RH37).

Tabla 4.7 Valores medios obtenidos por IAH parcial para cada región hidrológica (RH) con resultados.

RH	IAH valores habituales						IAH extremos máximos								IAH extremos mínimos						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.20	0.24	0.71	0.20	0.46	0.67	0.29	0.50	0.15	0.27	0.82	0.74	0.63	0.24	0.24	0.36	0.62	0.61	0.66	0.43	0.15
3	0.44	0.42	0.74	0.29	0.64	0.81	0.40	0.62	0.27	0.37	0.75	0.74	0.62	0.53	0.65	0.66	0.85	0.69	0.64	0.49	0.19
8	0.66	0.56	0.66	0.71	0.63	0.60	0.72	0.86	0.09	0.68	0.62	0.66	0.58	0.47	0.46	0.60	0.16	0.66	0.61	0.10	0.16
9	0.72	0.59	0.65	0.73	0.74	0.66	0.76	0.88	0.22	0.74	0.63	0.59	0.67	0.44	0.64	0.61	0.48	0.68	0.68	0.39	0.27
10	0.73	0.59	0.65	0.74	0.68	0.60	0.70	0.82	0.17	0.72	0.69	0.70	0.62	0.45	0.48	0.55	0.49	0.57	0.67	0.67	0.41
11	0.69	0.50	0.73	0.69	0.84	0.70	0.69	0.83	0.19	0.62	0.75	0.74	0.68	0.54	0.47	0.46	0.28	0.60	0.68	0.25	0.21
12	0.71	0.57	0.69	0.69	0.79	0.59	0.71	0.83	0.23	0.71	0.69	0.68	0.63	0.51	0.54	0.53	0.40	0.66	0.65	0.40	0.22
13	0.73	0.82	0.71	0.68	1.00	1.00	0.70	0.83	0.20	0.70	0.74	0.80	0.88	0.69	0.82	0.80	0.63	0.64	0.89	0.87	0.48
14	0.57	0.51	0.66	0.63	0.79	0.67	0.53	0.71	0.23	0.64	0.61	0.62	0.68	0.44	0.18	0.40	0.36	0.51	0.61	0.35	0.22
15	0.74	0.66	0.77	0.72	0.90	0.73	0.63	0.75	0.21	0.74	0.79	0.72	0.74	0.55	0.34	0.60	0.44	0.69	0.63	0.58	0.45
18	0.76	0.70	0.70	0.75	0.77	0.63	0.76	0.84	0.18	0.77	0.68	0.71	0.68	0.56	0.57	0.64	0.55	0.67	0.61	0.65	0.34
19	0.90	0.72	0.78	0.85	0.93	0.55	0.72	0.81	0.17	0.87	0.73	0.71	0.59	0.54	0.65	0.72	0.45	0.75	0.74	0.52	0.50
20	0.83	0.79	0.71	0.83	0.89	0.76	0.76	0.84	0.23	0.84	0.73	0.72	0.62	0.66	0.67	0.73	0.60	0.60	0.66	0.86	0.57
23	0.84	0.81	0.65	0.96	1.00	0.50	0.89	0.92	0.08	0.86	0.63	0.85	0.79	0.74	0.89	0.65	0.49	0.51	0.51	0.91	0.47
24	0.71	0.68	0.66	0.59	0.83	0.50	0.83	0.86	0.39	0.87	0.80	0.61	0.92	0.30	0.74	0.73	0.64	0.64	0.61	0.93	0.25
26	0.68	0.59	0.73	0.70	0.74	0.69	0.72	0.84	0.17	0.73	0.70	0.70	0.65	0.51	0.52	0.54	0.46	0.70	0.65	0.37	0.19
27	0.83	0.81	0.61	0.73	0.91	0.69	0.71	0.79	0.16	0.80	0.65	0.67	0.65	0.58	0.80	0.80	0.62	0.67	0.60	0.98	0.51
28	0.79	0.75	0.68	0.79	0.74	0.65	0.77	0.86	0.29	0.82	0.70	0.69	0.62	0.54	0.63	0.76	0.57	0.72	0.59	0.77	0.35
30	0.84	0.77	0.67	0.78	0.87	0.65	0.79	0.87	0.11	0.84	0.72	0.77	0.77	0.63	0.73	0.71	0.66	0.67	0.68	0.97	0.50
31	0.58	0.52	0.87	0.65	1.00	0.00	0.72	0.71	0.33	0.69	0.50	0.64	0.66	0.52	0.57	0.97	0.44	0.42	0.86	0.07	0.32
34	0.78	0.62	0.80	0.73	0.96	0.83	0.71	0.83	0.60	0.68	0.67	0.67	0.78	0.47	0.48	0.83	0.37	0.83	0.77	0.46	0.22
36	0.65	0.45	0.71	0.63	0.68	0.77	0.67	0.80	0.19	0.72	0.60	0.66	0.66	0.48	0.66	0.41	0.15	0.65	0.61	0.14	0.09
37	0.42	0.28	0.68	0.57	0.54	0.92	0.61	0.78	0.32	0.57	0.77	0.74	0.58	0.45	0.44	0.23	0.36	0.53	0.62	0.00	0.09

Finalmente, el número de días con caudal nulo (IAH20) y la estacionalidad de sequías (IAH21) se ha agravado, de manera general, en toda la república mexicana. Las áreas más afectadas son la región centro, norte y la costa oeste de México. Estos resultados son alarmantes ya que las zonas afectadas concentran más del 60% de la población y más del 70% de las actividades agrícolas e industriales (CONAGUA, 2015).

La Figura 4.21 muestra los resultados del análisis de variabilidad de los Índices de Alteración Globales de IAHRIS, donde cada punto en rojo corresponde a una cuenca cuyo $IAHG_i$ no se encuentre ubicado entre los percentiles 25 y 75. Las regiones hidrológicas con mayor variabilidad en el índice global de eventos extremos máximos (IAHG2) son: Lerma-Santiago (RH12), Costa de Jalisco (RH15), Balsas (RH18) y Papaloapan (RH28). En cuanto al índice global de eventos extremos mínimos, las regiones con mayor variabilidad son: Presidio-San Pedro (RH11), Lerma-Santiago (RH12), Río Ameca (RH14), Pánuco (RH26) y Nazas-Aguanaval (RH36). De las regiones analizadas, Lerma-Santiago (RH12) es la única que presenta variabilidad en ambos eventos extremos. Por tanto, es muy posible que el paradigma del régimen natural de caudales no sea aplicable a esta zona.

Si bien, los IAHs no explican el origen de sus alteraciones, sí permiten identificar los componentes que están siendo modificados en el régimen de los ríos. Con el fin de buscar posibles factores que pudieran estar vinculados con la alteración del régimen, se retomó algunos indicadores socio-económicos estimados por Cervantes-Jiménez (2015). La Tabla 4.8 muestra las variables consideradas y el método de extracción para ser agregado en las cuencas hidrológicas. De la Figura 4.22 a la Figura 4.24 se muestran dichos indicadores.

Tabla 4.8 Variables hidrológicas de subcuencas urbanas para México. Fuente: adaptada de Cervantes-Jiménez (2015).

	ID	Variable	Descripción	Unidades	Escala espacial	Extracción
Social	S6	Densidad de población	Número de personas por km ² .	hab/km ²	Municipio	Promedio
	S7	IDH	Índice de Desarrollo Humano.	Tasa	Municipio	Promedio
	S24	Disponibilidad natural media per cápita	Volumen de agua promedio per cápita.	m ³ /año	km ²	Promedio
Económica	EC4	PIB total	Producto Interno Bruto per cápita	\$/km ²	Municipio	Promedio
	EC8	Población económicamente activa total	Personas de 12 años y más que trabajaron; tenían trabajo, pero no trabajaron o buscaron trabajo en la semana de referencia.	hab	Municipio	Promedio

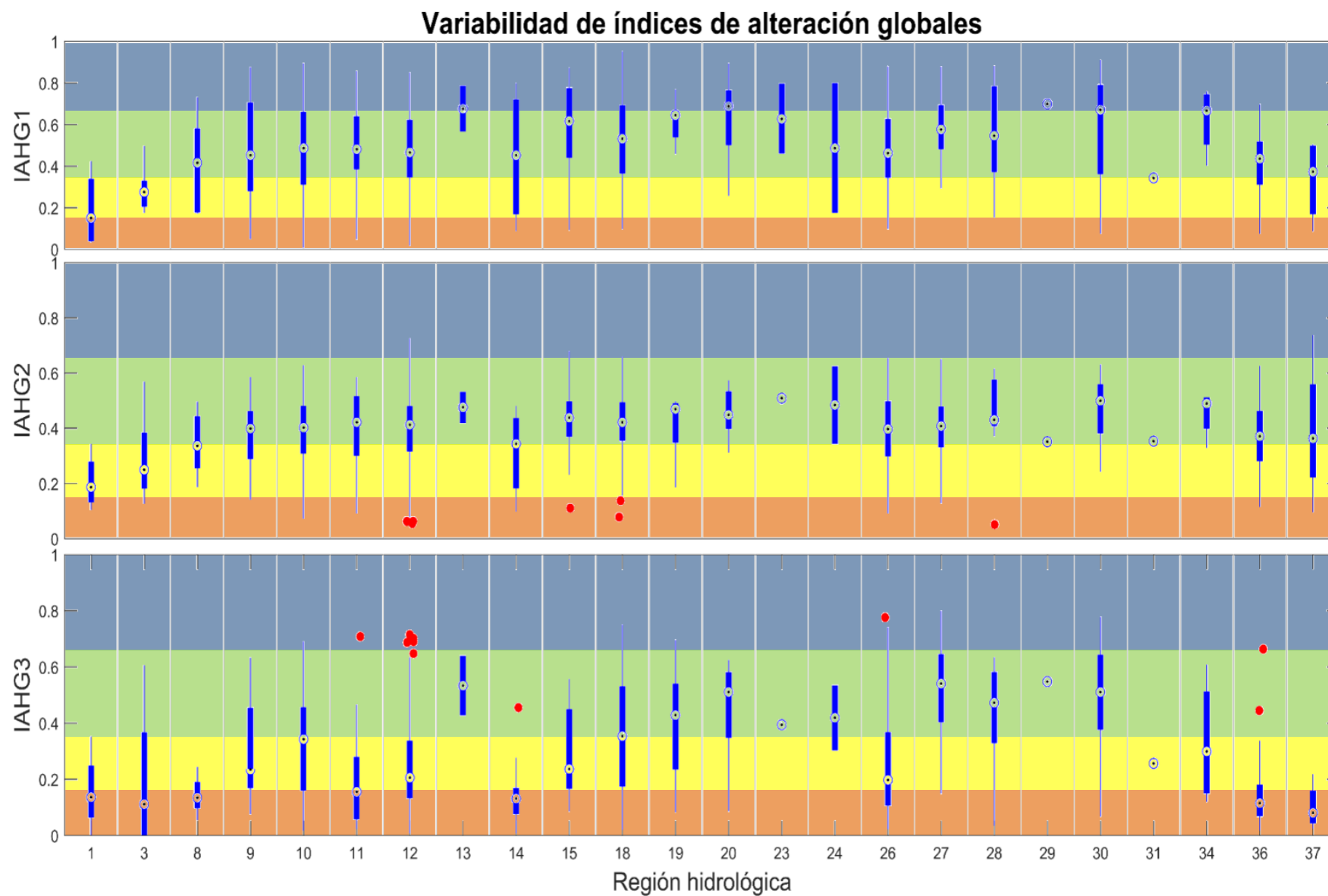


Figura 4.21 Boxplot de índices de alteración global por región hidrológica.

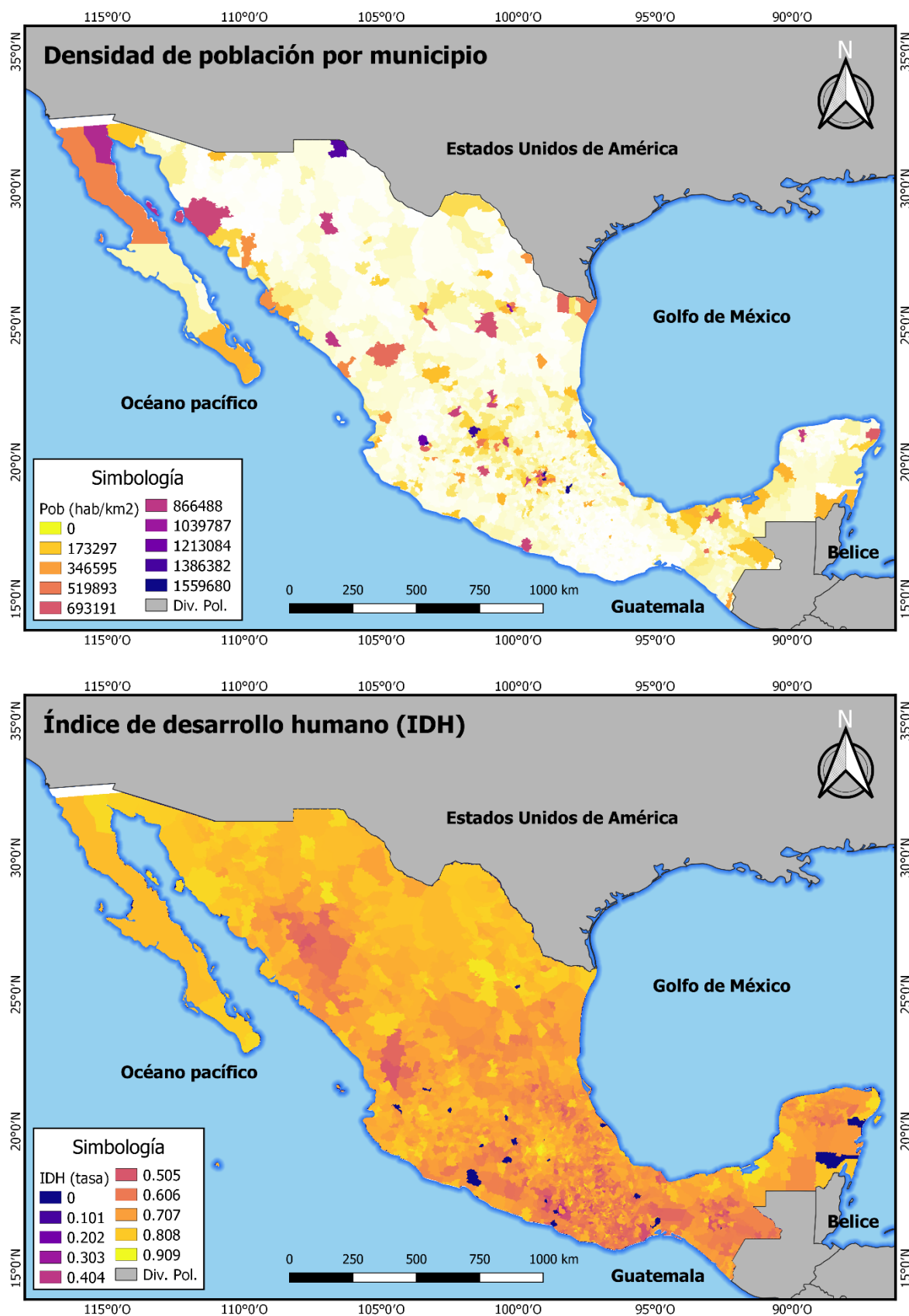


Figura 4.22 Mapas de densidad de población por municipio (hab/km²) e índice de desarrollo humano (tasa). Fuente: adaptada de [Cervantes-Jiménez \(2015\)](#).

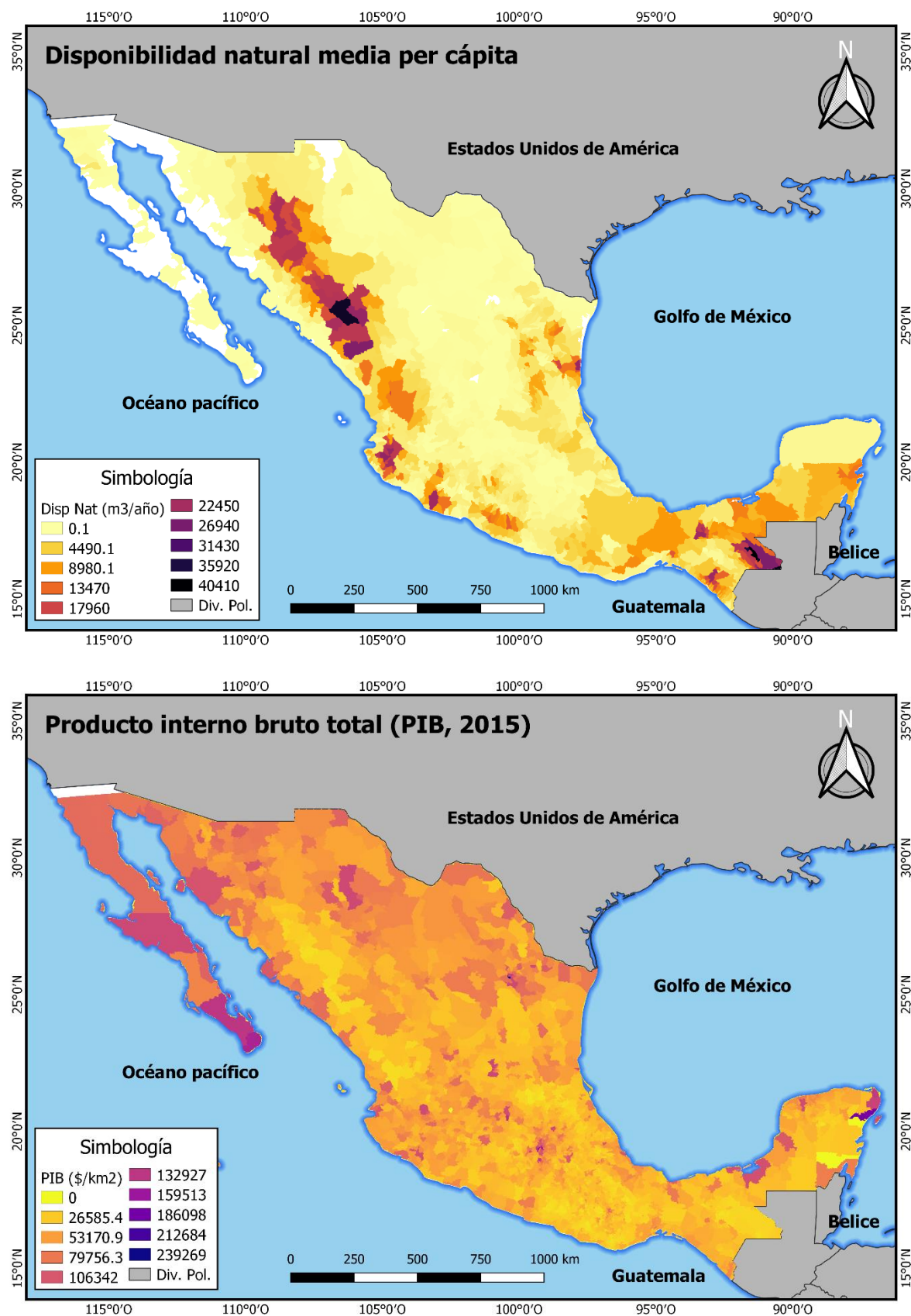


Figura 4.23 Mapas de disponibilidad natural media per cápita ($\text{m}^3/\text{año}$) y producto interno bruto total ($\$/\text{km}^2$). Fuente: adaptada de [Cervantes-Jiménez \(2015\)](#).

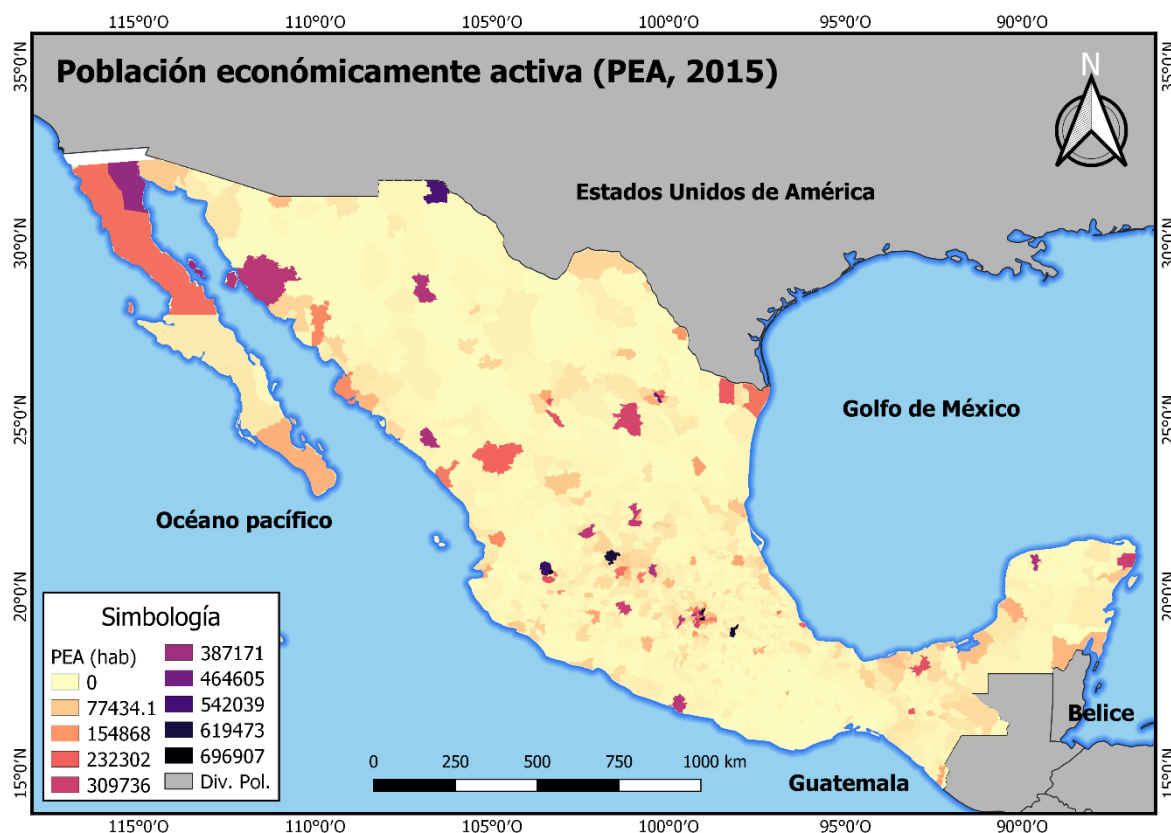


Figura 4.24 Mapa de población económicamente activa (hab). Fuente: adaptada de [Cervantes-Jiménez \(2015\)](#).

Las variables socioeconómicas muestran una concentración de la población en la parte centro del país. Al alejarse de esta área, la densidad de población disminuye notoriamente. Sin embargo, un alto porcentaje del producto interno bruto (PIB) nacional no se genera en el centro de la república mexicana, sino que se concentra en las Bajas Californias, Sonora, Chihuahua, Monterrey, Tabasco y Yucatán. Es en estos estados, junto con la Ciudad de México, Guanajuato y Jalisco, donde se localiza la mayor proporción de población económicamente activa (PEA). Por otro lado, la disponibilidad natural media per cápita se concentra al norte de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Sinaloa y Sonora. Se observa una ligera correlación espacial entre esta variable y el Índice de Desarrollo Humano (IDH) en esa zona.

Con la finalidad de buscar posibles correlaciones socioeconómicas con el estado de alteración de las cuencas hidrológicas, se superpusieron las cuencas no alteradas y alteradas sobre las cinco variables socioeconómicas. Posteriormente se extrajo un dato por cuenca según lo indica la Tabla 4.8 (ver detalle por cuenca en anexo digital). Para tal efecto, se empleó la herramienta informática orientada a los SIG: Qgis. De esta forma, se obtienen un valores socioeconómicos para cada cuenca alterada y no alterada que serán empleados dentro del proceso de regionalización en el Capítulo VIII. La Figura 4.25 muestra una comparación de cada variable socioeconómica con respecto al estado de alteración.

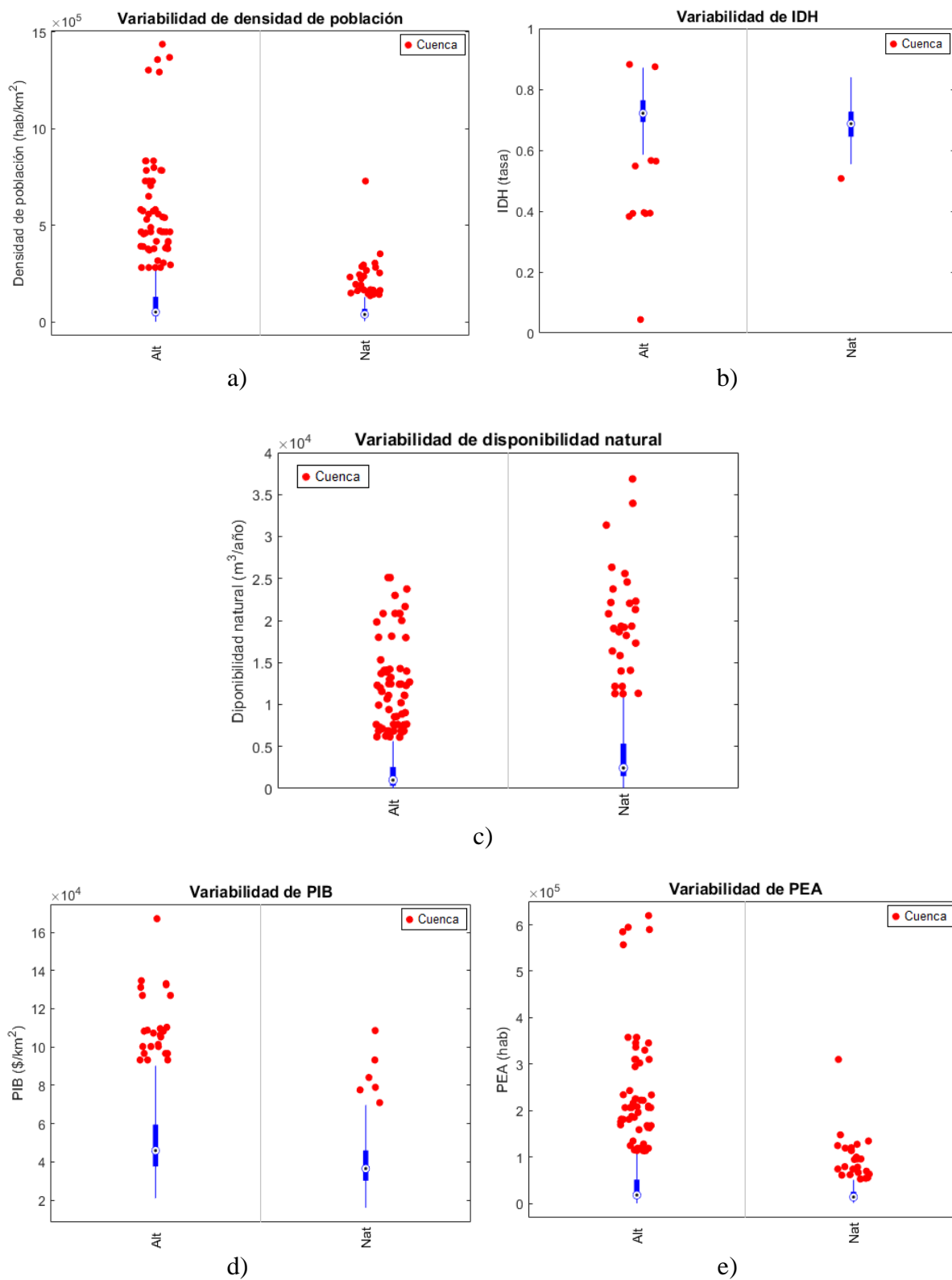


Figura 4.25 Variación de valores socio-económicos según el grupo de cuencas (Alt – alteradas y Nat – No alteradas): a) densidad de población; b) IDH; c) disponibilidad natural; d) PIB total y e) PEA.

El análisis socioeconómico muestra indicios que la densidad de población es un factor importante para detonar las condiciones de alteración. Al haber un incremento en la población, hay más demanda de todo tipo de recurso natural. Por esta razón, la disponibilidad natural media per cápita decrece en las cuencas hidrológicas alteradas. La explotación y transformación de los recursos naturales, en este grupo de cuencas, propician movimientos migratorios por ofertas laborales y/o escolares. Así, las grandes ciudades albergan una proporción significativa de la PEA y aportan notoriamente al PIB. Sin embargo, el IDH muestra menos variabilidad en el grupo de cuencas naturales y su valor medio es casi del mismo orden que el valor medio del IDH de las cuencas alteradas.

Lo anterior plantea dos retos, desde el punto de vista socioeconómico, para la rehabilitación de cuencas alteradas: i) implementar un régimen de caudal ecológico que satisfaga los requerimientos ambientales sin impactar la producción económica del país o de alguna cierta región y ii) satisfacer la demanda de recursos naturales y servicios a una población no distribuida uniformemente y en constante crecimiento.

4.4. Conclusiones y recomendaciones

La valoración de la alteración hidrológica en los ríos permite identificar modificaciones en los componentes de sus regímenes. A pesar de no proporcionar información sobre los agentes modificadores del escurrimiento, brindan un panorama general y particular del estado en cuestión. Las series divididas en parte ‘natural’ y ‘alterada’ consolidan la pauta para establecer condiciones de referencia en cada cauce. Esta línea base es indispensable para el desarrollo de métodos regionales para la estimación del caudal ecológico.

El análisis del régimen en valores habituales, eventos extremos máximos y eventos extremos mínimos proporciona resultados más detallados que el análisis de percentiles sugerido en la normatividad Mexicana vigente. Adicionalmente, los índices IAHRIS, permiten clasificar las cuencas por tipo de alteración de manera cualitativa y cuantitativa. De este modo es posible identificar modificaciones en el manejo y administración de las obras de regulación en México y sustentar la modificación del objetivo ambiental establecido en la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012.

Por otro lado, los ríos son el resultado de un equilibrio dinámico entre las variables climáticas, condiciones morfológicas y balance de energía en el proceso de escurrimiento. Lo anterior lleva a tener sistemas dinámicos cuyas condiciones varían en el tiempo y en el territorio. Por ello, la evaluación del estado del régimen hidrológico debe realizarse periódicamente para monitorear los cauces en rehabilitación o identificar nuevas áreas afectadas. Se recomienda que este análisis se realice cada 5 o 10 años.

El retorno a las condiciones de referencia puede ser una tarea poco factible en cuencas que han sido alteradas por periodos prolongados (centro, norte y costa oeste de México) y que tengan

una importancia socioeconómica. En dichos casos, se recomienda tomar los primeros años de alteración como nuevas condiciones de referencia. Si bien son caudales alterados, brindan una base para las políticas de regulación. La valoración cuantitativa y cualitativa de la alteración en componentes del régimen como magnitud, variabilidad y duración pueden emplearse en el diseño de regímenes para rehabilitación y/o conservación. Los caudales de diseño se compararían con los del régimen ‘natural’. De esta forma, se verificaría que el régimen se mantendrá en condiciones no alteradas.

La nueva aportación de este estudio radica en la valoración cuantitativa de los componentes del régimen. Garrido et al. (2010) mostraron los riesgos potenciales en el caudal ecológico de manera cualitativa. Otra aportación es la identificación de cuencas hidrológicas susceptibles a la rehabilitación. Es importante señalar que el estudio sólo evalúa las alteraciones en el régimen hidrológico de los caudales. Adicionalmente, se relacionó el estado de alteración con variables socioeconómicas para buscar posibles detonadores de alteración. Se recomienda complementar los resultados con estudios climáticos, de calidad de agua y biológicos.

CAPÍTULO 5

ESPACIALIZACIÓN DE

VARIABLES CLIMÁTICAS

5.1. Introducción

Las variables climáticas son de vital importancia para los estudios de hidrología, meteorología, climatología y ciencias relacionadas. Sus variaciones espacial y temporal permiten conocer la dinámica global de su naturaleza ([Webb et al., 2015](#)). Así mismo, permiten estimar diferentes indicadores que pueden ser utilizados en estudios de inundaciones, sequías, cambio climático, modelos lluvia-escurrimiento, entre otros.

La información de las variables climáticas es obtenida por medio de estaciones climatológicas convencionales y/o automáticas. Esto permite medir la magnitud de cada variable de forma puntual. Sin embargo, con frecuencia se desea conocer la magnitud de dichas variables en lugares no monitoreados. Debido a que se desconoce la información en todos los puntos de una cierta región, el valor de la variable climática debe ser estimado. La consolidación de valores estimados de variables climáticas, en sitios sin estación de monitoreo, es de vital importancia para estudios relacionados con la alteración hidrológica global de los ríos (e.g: cambio climático).

En la actualidad, existe una fuerte demanda por estimar los valores de variables climáticas como temperatura, precipitación, viento e insolación a escalas temporales diarias, mensuales o anuales (Sluiter, 2009; Chilès & Delfiner, 2012). El uso de los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) ha permitido la automatización de modelos de interpolación que permiten representar los valores estimados en una imagen en forma de malla ([Dobesch et al., 2007](#)). Esta labor requiere de un preprocesamiento de los datos climáticos a utilizar, selección de estaciones climáticas aptas para la interpolación a la escala temporal deseada, verificación de la ubicación geográfica de las estaciones y un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos dependen directamente de dicho procesamiento, la resolución del DEM, la génesis del fenómeno climático y del método de interpolación empleado para estimar los valores climáticos.

Los GIS y paqueterías más utilizados recientemente, por su contenido de métodos de interpolación, son: ArcMap, QGis, TerrSet y R con la paquetería gStat. Sin embargo, existe una amplia variedad de herramientas informáticas que se han especializado en algún método de interpolación (e.g: HydroDem; [Leblois, 2012](#)).

En general, los métodos de interpolación pueden ser clasificados en dos grupos: determinísticos y estocásticos ([Sluiter, 2009](#)). Los métodos determinísticos crean una superficie de la variable estimada con base en las características físicas de los puntos observados. Por su lado, los métodos estocásticos están basados en la teoría de probabilidad y el concepto de variables aleatorias. Los métodos estocásticos permiten obtener la varianza de la interpolación y estimar la significancia estadística.

Los métodos de interpolación también son clasificados como globales o locales. Los interpoladores globales usan una función con los datos de toda un área mientras que los interpoladores locales usan una función sobre un área acotada. Tveito ([2007](#)) menciona que los métodos de interpolación son exactos cuando el valor estimado reproduce el valor observado en los puntos con estaciones climáticas. En caso contrario, el método es aproximado y su variabilidad representa la incertidumbre del método.

5.2. Métodos de interpolación estocásticos

5.2.1. Distancia inversa ponderada

Este método considera que el valor estimado $\hat{V}(x_0)$ en el punto x_0 es el resultado de una combinación lineal entre los pesos ponderados w_{i0} y los valores de las variables en los puntos observados $V(x_i)$. Los pesos ponderados se obtienen como el inverso de la distancia entre los puntos observados x_i y el punto estimado x_0 :

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot V(x_i) \quad \text{Ec. 5-1}$$

$$w_{i0} = \frac{1}{d_{i0}}$$

Donde: $\hat{V}(x_0)$ es el valor estimado en el punto x_0 ; w_{i0} es el peso ponderado del punto x_i con respecto al punto x_0 ; d_{i0} es la distancia euclidiana entre los puntos x_i y x_0 ; $V(x_i)$ es el valor observado en el punto x_i .

Este método permite la anisotropía de los datos (o tendencia direccional). Su validación es por medio de una validación cruzada (*cross validation*). Sus resultados tienden a generar un efecto de circunferencias concéntricas en la imagen. Ha sido utilizado en la interpolación de anomalías en REGNIE (REGionalisierung räumlicher NIEDerschlagsverteilungen) por RWS

Deutscher Wetterdienst (Buishand et al., 2008). En general, sus resultados suelen ser menos precisos que los obtenidos por Kriging o modelos de regresión lineal.

5.2.2. Funciones polinomiales (Splines)

Estos métodos ajustan un polinomio de orden n a los valores en los puntos observados $V(x_i)$. En general, son interpoladores globales y cumplen con las características de los interpoladores exactos mediante el ajuste de varios polinomios en regiones con puntos observados traslapados. Para asegurar que no se muestran patrones oscilantes en los resultados, se aplica un algoritmo de suavizado en la imagen. La interpolación de factores externos o auxiliares puede realizarse con métodos polinomiales avanzados como ANUSPLIN (Hutchinson, 2008).

Su validación se realiza por medio de validación cruzada (*cross validation*; ver sección 5.2.7). Sus resultados han demostrado ser confiables para escalas temporales mensuales y anuales más no para escalas diarias u horarias (Tveito, 2007). En México, estas funciones han sido aplicadas para generar superficies de temperatura y precipitación (Cuervo-Robayo et al., 2013) mostrando excelentes resultados para el caso de la temperatura, pero no para la precipitación.

5.2.3. Regresiones lineales

Expresan la relación entre la variable dependiente $\hat{V}(x_0)$ y una o más variables explicativas $A(x_i)$, $B(x_i)$, ..., $Z(x_i)$. Estos métodos simplemente forman una línea recta que es ajustada a los valores observados de las n variables independientes. Frecuentemente funcionan como interpoladores globales. Se asume la dependencia espacial entre las variables explicativas y la variable explicada. Se pueden incluir factores de cambios externos o auxiliares. Estos métodos proporcionan la estimación de la varianza y el error estándar de la interpolación (Sluiter, 2009).

5.2.4. Kriging

Es un método estocástico que introduce el concepto de variable aleatoria. Este método fue desarrollado en Sudáfrica por los trabajos empíricos de Danie G. Krige y formalizados por George Matheron en 1960 (Wackernagel, 2003). La ecuación general se asemeja a la del método de la distancia invertida ponderada. El método considera que el valor estimado $\hat{V}(x_0)$ en el punto x_0 es el resultado de una combinación lineal entre los pesos ponderados w_i y los valores de las variables en los puntos observados $V(x_i)$. Existen diferentes variantes del método original con características propias. Ya que el método de Kriging es empleado en el presente trabajo de investigación, sus principios, características y ecuaciones se profundizan en las secciones siguientes.

El variograma

Antes de introducir el método de Kriging, es importante construir un modelo que refleje la dependencia espacial y la covarianza entre los valores de dos puntos observados. Lo anterior se logra por medio de una curva ajustada conocida como variograma. El variograma es un método geoestadístico usado para el análisis de datos espaciales (Webster & Oliver, 2007). Este método asume que la relación espacial entre dos puntos no depende directamente de su ubicación geográfica absoluta, sino de su ubicación geográfica relativa (Wackernagel, 2003). Su finalidad es reflejar las diferencias existentes entre las ubicaciones de dos puntos y la distancia (h) que los separa. Wackernagel (2003) propone los siguientes pasos para la obtención del variograma:

- i) Graficar la nube del variograma a partir de la disimilitud entre dos puntos y distancia que los separa.
- ii) Construir el variograma experimental agrupando distancias similares (h).
- iii) Ajustar el variograma experimental con un modelo de variograma paramétrico eligiendo el modelo de mejor ajuste.

Variograma teórico

El variograma teórico es el resultado del ajuste de un variograma paramétrico a los datos observados. Su finalidad es la de medir la relación espacial entre dos variables aleatorias $V(x)$ y cómo se correlacionan entre sí. En teoría es una función que usa la varianza de los incrementos de dos puntos $V(x+h) - V(x)$ y vector de distancia h . Matheron (1963) y Cressie (1993) definieron al variograma teórico como:

$$2\gamma(h) = \text{Var}(V(x+h) - V(x)) = E\left\{(V(x+h) - V(x))^2\right\} \quad \forall x, x+h \in \mathcal{R} \quad \text{Ec. 5-2}$$

Los incrementos muestran la variación espacial de $V(x)$ y la varianza actúa como medida de la dispersión media de los valores. En la mayor parte de la literatura $2\gamma(h)$ es referida como semivarianza, semivariograma o variograma y es denotada como $\gamma(h)$. En el presente trabajo se adoptará la denotación $\gamma(h)$ para hacer alusión al variograma.

Para que la Ec. 5-2 sea válida, es necesario que la función aleatoria $V(x)$ sea intrínsecamente estacionaria, es decir, que cumpla las siguientes condiciones:

- i. La media de los incrementos $\mu(h)$ es invariante en traslación y es igual a cero sin importar la ubicación de h en \mathcal{R} .
- ii. La varianza de los incrementos es finita y su valor sólo depende de la separación h en el dominio de \mathcal{R} .

Sin embargo, lo anterior sólo implica la existencia del variograma, pero no de una covarianza finita. Para representar una equivalencia entre la covarianza $C(h)$ con su respectivo variograma $\gamma(h)$ se asume que la función aleatoria $V(x)$ es estacionaria de segundo orden, es decir, es estacionaria a los primeros dos momentos: media μ y covarianza $C(h)$. El variograma equivalente a la covarianza queda expresado como:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad \text{Ec. 5-3}$$

Donde: $\gamma(h)$ es el variograma de los vectores de distancia h ; $C(h)$ es la covarianza de los vectores de distancia h y $C(0)$ es el valor en el que $\lim_{|h| \rightarrow \infty} \gamma(h) < \infty$.

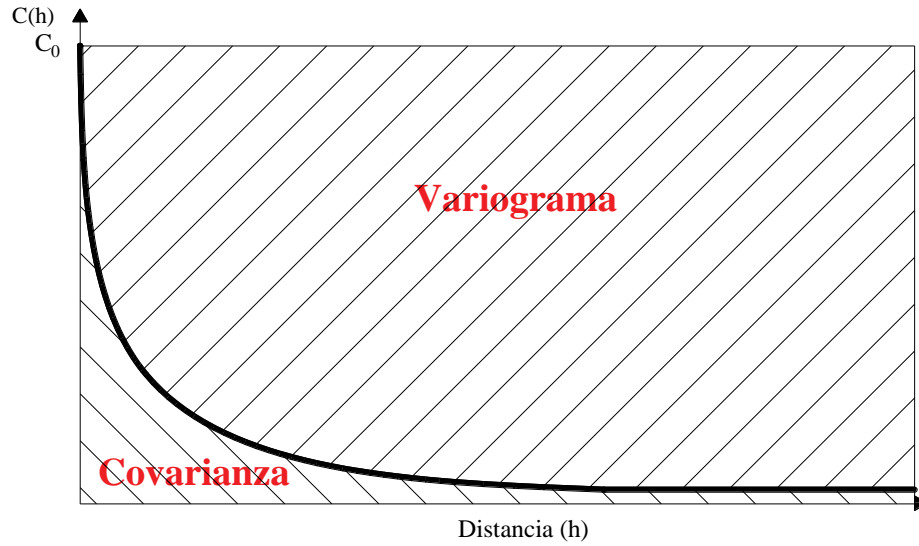


Figura 5.1 Relación gráfica entre variograma y covarianza.

Nube de variograma y variograma experimental

De la teoría del variograma teórico se puede deducir un variograma experimental a partir de la ubicación geográfica de los datos observados $V(x_i)$ para medir la dependencia espacial entre los puntos. En la práctica, el verdadero variograma es desconocido por lo que se requiere estimarlo por medio de las disimilitudes entre las observaciones.

La disimilitud entre dos puntos x_i y x_j se expresa como:

$$\gamma_{ij}^* = \frac{(V(x_i) - V(x_j))^2}{2} \quad \text{Ec. 5-4}$$

Donde: γ_{ij}^* es la disimilitud entre los puntos x_i y x_j ; $V(x_i)$ es el valor observado en el punto x_i ; $V(x_j)$ es el valor observado en el punto x_j .

Al gráfico de las disimilitudes entre dos puntos y la distancia h que los separa se conoce como nube de variograma (Figura 5.2 a).

Eventualmente se encontrarán puntos con una disimilitud γ_{ij}^* diferente para una misma distancia de separación h . La variación de disimilitudes se resuelve agrupando los datos con una misma distancia de separación (Figura 5.2 b) o bien dentro de un rango de distancias mediante la expresión:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (V(x_i) - V(x_j))^2 \quad \text{Ec. 5-5}$$

Donde: $\gamma^*(h)$ es la disimilitud promedio para una distancia de separación h ; $N(h)$ es el número de puntos x_i, x_j con distancia de separación h ; $V(x_i)$ es el valor observado en el punto x_i ; $V(x_j)$ es el valor observado en el punto x_j .

Ajuste al variograma experimental

El variograma experimental $\gamma^*(h)$ es la primera aproximación al variograma teórico $\gamma(h)$ que puede ser utilizado para caracterizar la estructura espacial en el método de interpolación de Kriging. Generalmente, cualquier función podría ajustarse al variograma experimental. Sin embargo, existen varios modelos de variogramas paramétricos que facilitan el ajuste en tanto se conozcan los valores de sus parámetros.

Cualquier variograma paramétrico está conformado, por tres parámetros:

- i. Silo (*sill*): es el valor dado por $\lim_{|h| \rightarrow \infty} \gamma(h)$
- ii. Efecto pepita (*nugget*): si el variograma experimental es discontinuo al origen, entonces el salto C_0 es conocido como efecto pepita y puede ser causado por errores de medición o variación a microescala.
- iii. Rango (*range*): es la distancia h a la cual el variograma $\gamma(h)$ excede el valor de silo y se estabiliza.

En la práctica, el valor del rango es equivalente al 95% de la distancia a la cual el variograma alcanza el valor del silo. Esto se debe a que, frecuentemente, dicho valor se alcanza asintóticamente. La Tabla 5.1 presenta los modelos de variogramas paramétricos más usados comúnmente.

El ajuste de cualquier variograma paramétrico a los datos del variograma experimental es conocido como variograma teórico y es una aproximación de la relación espacial de los puntos observados. La Figura 5.2 muestra el proceso desde las disimilitudes de la nube de variograma hasta el variograma ajustado.

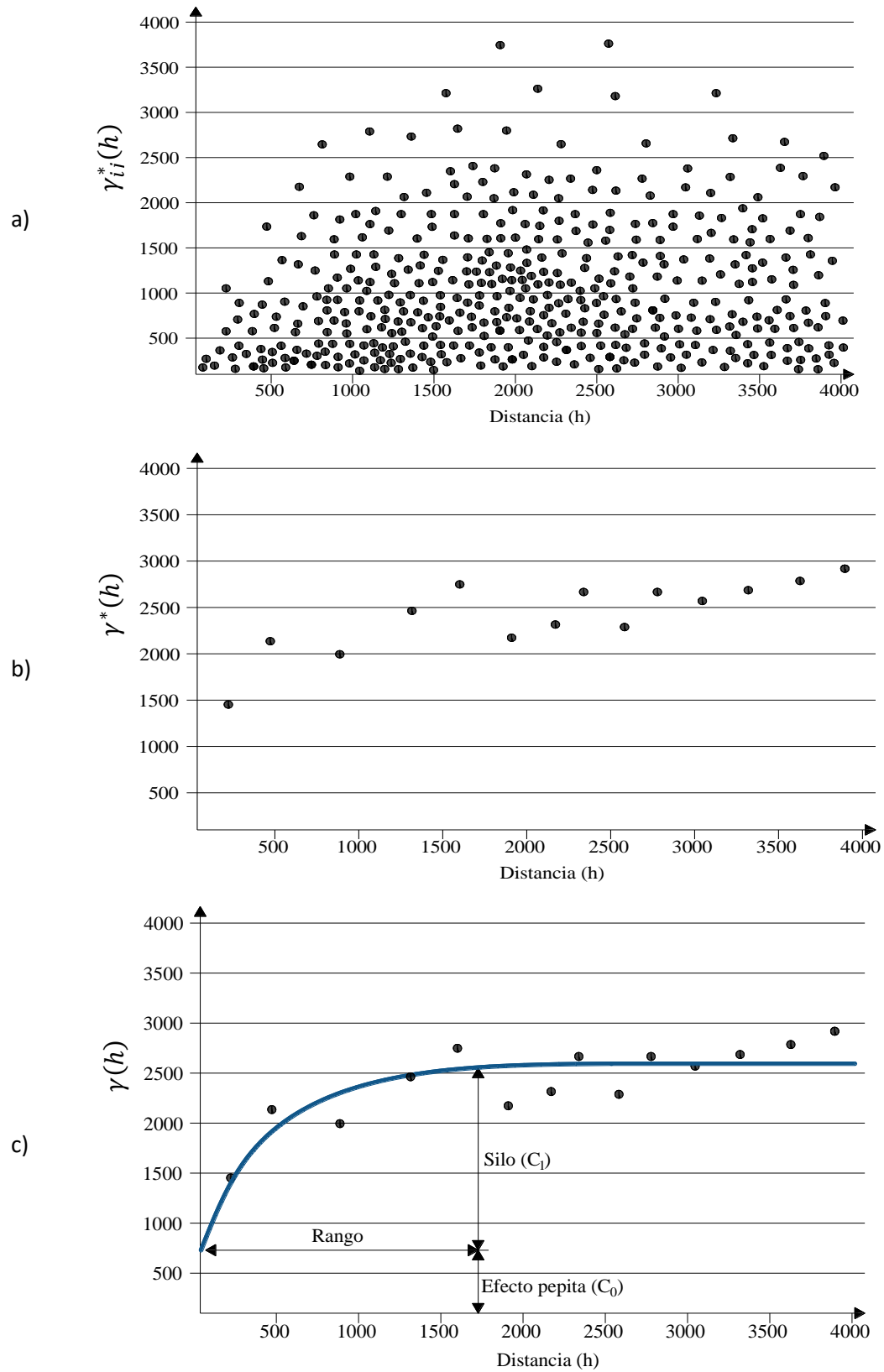


Figura 5.2 Proceso de análisis variográfico: a) nube de variograma, b) variograma experimental, c) variograma teórico.

Tabla 5.1 Modelos de variogramas paramétricos. Fuente: adaptada de [Lichtenstern \(2013\)](#).

Modelo	Expresión
Efecto <i>nugget</i>	$\gamma_{a,C_0,C_1}^{nug}(h) = \begin{cases} 0 & si h = 0 \\ C_0 + C_1 & si h > 0 \end{cases}$
	$C_{a,C_0,C_1}^{nug}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 & si h = 0 \\ 0 & si h > 0 \end{cases}$
Esférico	$\gamma_{a,C_0,C_1}^{sph}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3 h }{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{ h }{a} \right)^3 \right) & si 0 < h < a \\ C_0 + C_1 & si h > a \end{cases}$
	$C_{a,C_0,C_1}^{sph}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(1 - \frac{3 h }{2a} + \frac{1}{2} \left(\frac{ h }{a} \right)^3 \right) & si 0 < h < a \\ 0 & si h > a \end{cases}$
Exponencial	$\gamma_{a,C_0,C_1}^{exp}(h) = \begin{cases} 0 & si h = 0 \\ C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{ h }{a}\right) \right) & si h > 0 \end{cases}$
	$C_{a,C_0,C_1}^{exp}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 & si h = 0 \\ C_1 \left(\exp\left(-\frac{ h }{a}\right) \right) & si h > 0 \end{cases}$
Gausiano	$\gamma_{a,C_0,C_1}^{gau}(h) = \begin{cases} 0 & si h = 0 \\ C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{ h ^2}{a^2}\right) \right) & si h > 0 \end{cases}$
	$C_{a,C_0,C_1}^{gau}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 & si h = 0 \\ C_1 \left(\exp\left(-\frac{ h ^2}{a^2}\right) \right) & si h > 0 \end{cases}$
Matern	$\gamma_{a,C_0,C_1}^{mat}(h) = \begin{cases} 0 & si h = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \frac{1}{2^{v-1}\Gamma(v)} \left(\frac{ h }{a} \right)^v K_v \left(\frac{ h }{a} \right) \right] & si h > 0 \end{cases}$
	$C_{a,C_0,C_1}^{mat}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 & si h = 0 \\ C_0 + C_1 \left[\frac{1}{2^{v-1}\Gamma(v)} \left(\frac{ h }{a} \right)^v K_v \left(\frac{ h }{a} \right) \right] & si h > 0 \end{cases}$

Donde $\gamma_{a,C_0,C_1}^{mod}(h)$ es el variograma de rango a ; efecto pepita C_0 ; silo C_1 ; distancia de separación h y su respectiva función de covarianza $C_{a,C_0,C_1}^{mod}(h)$; K_v es la función de biselado; v es el coeficiente de suavizado $[0,\infty)$; $\Gamma(v)$ es la función gamma.

Kriging ordinario

El método de kriging ordinario es comúnmente asociado con el acrónimo B.L.U.E. (por sus siglas en inglés “*Best Linear Unbiased Estimator*”). Este método es ‘lineal’ ya que sus estimadores provienen de una combinación lineal ponderada de los datos disponibles. Es ‘insesgado’ ya que procura que la media residual o error sea igual a 0. Se dice el ‘mejor’ ya que reduce la varianza de los errores ($\tilde{\sigma}_R^2$), siendo ésta la principal característica del método.

En la práctica se desconocen estadísticos de la población de un área de estudio, pero se pueden conocer los estadísticos de una muestra o de un modelo matemático. El método de Kriging Ordinario construye un modelo que logra reducir la media del error y la varianza de éstos a partir de las series de datos observados.

Modelo aleatorio y condición de no sesgo

En geoestadística, se puede conocer el valor de un punto cualquiera mediante una combinación lineal de los puntos de la muestra con datos observados:

$$\hat{v} = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_j \quad \text{Ec. 5-6}$$

Donde: \hat{v} es el valor estimado; w_j es el peso ponderado de los datos observados; v_j es el valor de los datos observados y n el número de datos de la muestra.

El conjunto de los pesos ponderados cambia conforme se estima un valor desconocido en una ubicación diferente.

Por otro lado, el error en la estimación queda definido como:

$$r_i = \hat{v}_i - v_i \quad \text{Ec. 5-7}$$

Y la media de los errores queda definida como:

$$m_R = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{v}_i - v_i \quad \text{Ec. 5-8}$$

Desafortunadamente, la Ec. 5-8 requiere la información real en los puntos cuyo valor se estima. La solución probabilística consiste en conceptualizar a los valores desconocidos como la salida de un proceso aleatorio y solucionar el problema del modelo conceptual. Para cada punto donde se desea estimar un valor desconocido, el modelo es una función aleatoria estacionaria que consiste en varias variables aleatorias, una por cada valor de las ubicaciones de los puntos observados $V(x_1), \dots, V(x_n)$ y una para el valor del punto a estimar $V(x_0)$. Cada una de estas variables tiene la misma ley de probabilidad en todas las ubicaciones, por lo que el valor esperado de la variable aleatoria es $E\{V\}$. Cualquier par de variables aleatorias tiene una

distribución que depende únicamente de la separación entre dos puntos y no de su ubicación. La covarianza entre pares de variables aleatorias separadas por una distancia h es $\tilde{C}_v(h)$.

Cada valor en el modelo es visto como el resultado de una variable aleatoria; incluso los valores en los puntos observados. El estimador también es una variable aleatoria ya que es una combinación lineal ponderada de las variables aleatorias en la ubicación de los puntos observados:

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) \quad \text{Ec. 5-9}$$

Donde: $\hat{V}(x_0)$ es el valor estimado en el punto x_0 ; $V(x_i)$ es el valor observado en el punto x_i ; w_i es el peso ponderado del valor observado en el punto x_i ; n es el número total de datos observados.

De la misma forma, el error estimado en la diferencia entre la estimación y la variable aleatoria que modela el valor observado.

$$R(x_0) = \hat{V}(x_0) - V(x_0) \quad \text{Ec. 5-10}$$

Sustituyendo la Ec. 5-9 en la Ec. 5-10 se obtiene una ecuación donde el error $R(x_0)$ está expresado sólo en términos de las $n+1$ variables aleatorias originales:

$$R(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) - V(x_0) \quad \text{Ec. 5-11}$$

Se considera que el error del modelo es igual a 0. Como se mencionó, la variable aleatoria es estacionaria, lo que permite expresar el valor esperado de cualquier variable aleatoria $E\{V(x_i)\}$ como $E\{V\}$. De esta forma se tiene:

$$\begin{aligned} E\{R(x_0)\} &= 0 = E\left\{\sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) - V(x_0)\right\} \\ &= \sum_{i=1}^n w_i \cdot E\{V(x_i)\} - E\{V(x_0)\} \\ &= E\{V\} \sum_{i=1}^n w_i - E\{V\} \\ E\{V\} \sum_{i=1}^n w_i &= E\{V\} \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \text{Ec. 5-12}$$

Varianza del error

Kriging ordinario se caracteriza por producir una serie de estimaciones cuya varianza de los errores sea mínima. La varianza de los errores, σ_R^2 , de un número k de estimaciones puede ser denotada como:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (r_i - m_R)^2 \quad \text{Ec. 5-13}$$

Sustituyendo las ecuaciones Ec. 5-7 y Ec. 5-8 en la ecuación Ec. 5-13 se tiene:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\hat{v}_i - v_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\hat{v}_i - v_i) \right]^2 \quad \text{Ec. 5-14}$$

Si se asume que el error medio es igual a cero, la ecuación se simplifica a:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (r_i - 0)^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\hat{v}_i - v_i]^2 \quad \text{Ec. 5-15}$$

Nuevamente, la Ec. 5-15 requiere conocer el valor real en cada punto a estimar (v_i). Sin embargo, se puede minimizar la varianza de los errores del modelo $R(x_0)$ (Ec. 5-10). Esto lleva a encontrar una expresión para el error en la varianza modelada ($\hat{\sigma}_R^2$) e igualar a 0 las derivadas parciales de la expresión. Se sabe que el error es una variable aleatoria, ya que es una combinación lineal de variables aleatorias. Se puede demostrar que la expresión de la varianza de una combinación lineal es (Isaaks & Srivastava, 1989):

$$\text{Var} \left\{ \sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) \right\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \cdot w_j \cdot \text{Cov}\{V_i V_j\} \quad \text{Ec. 5-16}$$

Usando la Ec. 5-15 y la Ec. 5-10 se puede expresar la varianza del error como:

$$\begin{aligned} \text{Var}\{R(x_0)\} &= \text{Cov}\{\hat{V}(x_0)\hat{V}(x_0)\} - \text{Cov}\{\hat{V}(x_0)V(x_0)\} - \text{Cov}\{V(x_0)\hat{V}(x_0)\} \\ &\quad + \text{Cov}\{V(x_0)V(x_0)\} \\ &= \text{Cov}\{\hat{V}(x_0)\hat{V}(x_0)\} - 2\text{Cov}\{\hat{V}(x_0)V(x_0)\} \\ &\quad + \text{Cov}\{V(x_0)V(x_0)\} \end{aligned} \quad \text{Ec. 5-17}$$

El primer término de la Ec. 5-17 es la covarianza de $\hat{V}(x_0)$ consigo mismo, es decir, la varianza de $\hat{V}(x_0)$. Haciendo uso de la Ec. 5-9 se expresa el primer término como:

$$Var\{\hat{V}(x_0)\hat{V}(x_0)\} = Var\left\{\sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i)\right\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} \quad \text{Ec. 5-18}$$

El segundo término de la Ec. 5-17 se puede escribir como:

$$\begin{aligned} 2Cov\{\hat{V}(x_0)V(x_0)\} &= 2Cov\left\{\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot V_i\right)V_0\right\} \\ &= 2E\left\{\sum_{i=1}^n w_i V_i \cdot V_0\right\} - 2E\left\{\sum_{i=1}^n w_i V_i\right\} \cdot E\{V_0\} \\ &= 2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot E\{V_i, V_0\} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot E\{V_i\} \cdot E\{V_0\} \\ &= 2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot Cov\{V_i V_0\} \\ &= 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} \end{aligned} \quad \text{Ec. 5-19}$$

El tercer término de la Ec. 5-17 es la covarianza de la variable aleatoria $V(x_0)$ consigo misma. Asumiendo que todas las variables aleatorias tienen la misma varianza se expresa como:

$$Cov\{V(x_0)V(x_0)\} = \tilde{\sigma}^2 \quad \text{Ec. 5-20}$$

Juntando nuevamente las tres últimas ecuaciones se tiene:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} \quad \text{Ec. 5-21}$$

La Ec. 5-21 deja el error estimado en función de la varianza de los datos observados ($\tilde{\sigma}^2$), las covarianzas entre los datos (\tilde{C}_{ij}) y los pesos ponderados de las n variables aleatorias o datos observados (w_i, \dots, w_n). El valor mínimo de la ecuación se obtiene al igualar las n derivadas parciales a 0. Lo que produce un sistema de n ecuaciones lineales que puede ser resuelto por cualquier método de ecuaciones lineales. Sin embargo, la solución se restringe a que la suma de los pesos ponderados debe ser igual a 1 (Ec. 5-12).

Multiplicador de Lagrange y solución del sistema

Este procedimiento permite convertir un sistema de ecuaciones restringido a uno no restringido. Si se minimiza $\tilde{\sigma}_R^2$ produce un sistema de n ecuaciones con n incógnitas. La condición de imparcialidad agrega una ecuación más al sistema sin agregar incógnitas. Lo anterior deja el sistema con $n + 1$ ecuaciones y n incógnitas. Para balancear el número de incógnitas se introduce el parámetro de Lagrange (\mathcal{L}) de la siguiente forma:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} - \underbrace{2\mathcal{L} \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right)}_{=0} \quad \text{Ec. 5-22}$$

Donde la derivada parcial de $\tilde{\sigma}_R^2$ con respecto a \mathcal{L} e igualada a 0, produce la condición de no sesgo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial \mathcal{L}} &= \frac{\partial(2\mathcal{L}(\sum_{i=1}^n w_i - 1))}{\partial \tau} = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n w_i - 2 &= 0 \\ \sum_{i=1}^n w_i &= 1 \end{aligned} \quad \text{Ec. 5-23}$$

De esta forma se asegura que el resultado de la solución de las ecuaciones lineales, producto de las derivadas parciales de $\tilde{\sigma}_R^2$, produzca una serie de pesos ponderados bajo la condición de que su suma sea igual a 1. El resultado también produce el valor de \mathcal{L} que es utilizado para estimar el error de la varianza. De manera similar, se puede demostrar que las derivadas parciales $\tilde{\sigma}_R^2$ de con respecto a cada peso w_i e igualada a cero es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial w_1} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{1j} - 2\tilde{C}_{10} + 2\mathcal{L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{1j} + \mathcal{L} = \tilde{C}_{10} \\ &\vdots \\ \frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial w_i} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{ij} - 2\tilde{C}_{i0} + 2\mathcal{L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{ij} + \mathcal{L} = \tilde{C}_{i0} \\ &\vdots \\ \frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial w_n} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{nj} - 2\tilde{C}_{n0} + 2\mathcal{L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{nj} + \mathcal{L} = \tilde{C}_{n0} \end{aligned}$$

Lo anterior produce un sistema de $n + 1$ ecuaciones lineales que puede ser expresado en forma matricial como:

$$C \cdot w = D$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 5-24}$$

Por lo que el sistema de las $n + 1$ ecuaciones puede ser resuelto de la forma:

$$w = C^{-1} \cdot D \quad \text{Ec. 5-25}$$

De esta forma, el valor estimado $\hat{V}(x_0)$ queda expresado como una combinación lineal:

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot V_i \quad \text{Ec. 5-26}$$

Donde: $\hat{V}(x_0)$ es el valor estimado en el punto x_0 ; w_i es el peso ponderado para cada valor observado y V_i es el valor observado.

Sustituyendo los resultados obtenidos del sistema en la Ec. 5-21 se llega al valor minimizado de la varianza del error, comúnmente conocida como la varianza de kriging:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 - \left(\sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + \mathcal{L} \right) \quad \text{Ec. 5-27}$$

Donde: $\tilde{\sigma}_R^2$ es la varianza de estimación de kriging; $\tilde{\sigma}^2$ es la varianza *a priori* de los datos observados; w_i es el peso ponderado para cada valor observado; \tilde{C}_{i0} es la covarianza entre el dato observado i y el punto deseado 0 y \mathcal{L} es el parámetro de Lagrange que produce la condición de no sesgo.

El sistema de la Ec. 5-24 queda expresado en función de la covarianza entre las variables. Para estimar dicha covarianza en cualquier punto x_0 se hace uso del covariograma o su inverso: el variograma. El sistema de la Ec. 5-24 expresado en términos del variograma es:

$$\gamma \quad \cdot \quad w = D$$

$$\begin{bmatrix} -\tilde{\gamma}_{11} & \cdots & -\tilde{\gamma}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -\tilde{\gamma}_{n1} & \cdots & -\tilde{\gamma}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{\gamma}_{10} \\ \vdots \\ -\tilde{\gamma}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 5-28}$$

El valor estimado de kriging por variograma se obtiene de la misma forma que el estimado por covariograma (Ec. 5-26). Sin embargo, la varianza cambia al resolver el sistema de la Ec. 5-28:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \left(\sum_{i=1}^n w_i \tilde{\gamma}_{i0} + \mathcal{L} \right) \quad \text{Ec. 5-29}$$

Donde: $\tilde{\sigma}_R^2$ es la varianza de estimación de kriging; w_i es el peso ponderado para cada valor observado; $\tilde{\gamma}_{i0}$ es el valor de variograma entre el dato observado i y el punto deseado 0 y \mathcal{L} es el parámetro de Lagrange que produce la condición de no sesgo.

Kriging con factor de cambio externo

Este método es una extensión del kriging ordinario donde la media del sistema μ no es constante. Se asume que existen funciones externas que están físicamente correlacionadas con la variable a estimar (covariables). Por ejemplo, al interpolar la temperatura por kriging ordinario, el valor estimado $\hat{V}(x_0)$ en el punto x_0 depende únicamente de la distancia de separación h entre las estaciones climáticas. En lugares donde la altitud no cambia bruscamente, es correcta la afirmación. Sin embargo, en lugares con topografía accidentada, la temperatura deja de estar fuertemente correlacionada con la distancia entre estaciones y es afectada por un factor de cambio externo: la altitud.

Este método divide una función aleatoria en una combinación lineal de funciones deterministas, una tendencia de variación no estacionaria $\mu(x)$ llamada factor de cambio (*drift*) y un componente aleatorio $Y(x_i) = V(x_i) - \mu(x)$ que representa la función aleatoria residual del sistema (Wackernagel, 2003). De esta forma, se introduce una tendencia en la media μ en el valor estimado de tal forma que $\hat{V}(x_0)$ contiene un componente sistemático además del componente aleatorio (Webster & Oliver, 2007). Las ecuaciones de este modelo se obtienen de manera similar a las obtenidas en kriging ordinario (Wackernagel, 2003; Webster & Oliver, 2007). La diferencia radica en expandir el sistema de la Ec. 5-24 un número k de funciones $f(x)$ y ajustar el variograma teórico al variograma experimental de los residuales de la regresión multivariable de los k factores de cambio:

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 & f_0(x_1) & \cdots & f_k(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 & f_0(x_n) & \cdots & f_k(x_n) \\ \hline 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_0(x_1) & \cdots & f_0(x_n) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_k(x_1) & \cdots & f_k(x_n) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w \\ w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mathcal{L} \\ \mu_{f_0} \\ \vdots \\ \mu_{f_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \\ f_0(x_0) \\ \vdots \\ f_k(x_0) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 5-30}$$

El valor estimado $\hat{V}(x_0)$ se obtiene de la misma forma que el método de kriging ordinario (Ec. 5-26). Siendo su varianza:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 - \left(\sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + \mathcal{L} + \mu_{f_0} \cdot f_0(x_0) + \cdots + \mu_{f_k} \cdot f_k(x_0) \right) \quad \text{Ec. 5-31}$$

Donde: $\tilde{\sigma}_R^2$ es la varianza de kriging; $\tilde{\sigma}^2$ es la varianza *a priori* de los datos observados; w_i es el peso ponderado para cada valor observado; \tilde{C}_{i0} es la covarianza entre el punto i y el punto deseado

0; \mathcal{L} es el parámetro de Lagrange que produce la condición de no sesgo; μ_{f_0} es la media de la función externa de cambio f_0 ; $f_0(x_0)$ es la función externa de cambio evaluada en el punto x_0 .

El variograma teórico se ajusta al variograma experimental de los residuales de una regresión lineal multivariable de la forma:

$$X = c + \alpha(x_1) + \beta(x_2) + \cdots + \omega(x_n) + \varepsilon \quad \text{Ec. 5-32}$$

Donde: X es la variable dependiente; $\alpha, \beta, \dots, \omega$ son los coeficientes de la regresión lineal multivariable; x_1, x_2, \dots, x_n son las variables independientes y ε es el vector de los residuales de la regresión.

En la práctica, se pueden usar los residuales de la función que mejor describa la variación entre las variables dependientes y la variable independiente.

5.2.6. Simulación geoestadística

Frecuentemente en el campo de la hidrología se busca estimar algún dato hidrológico en lugares donde no existe ninguna estación de aforo. El método de interpolación para estimar dichos datos varía según la naturaleza del fenómeno a estimar. Por ejemplo, la temperatura presenta comodidades en la interpolación gracias a su continuidad espacial. En contraposición, la precipitación es un fenómeno que carece de continuidad espacial (e.g: puede llover en Toluca, pero no en Metepec). La temperatura de ríos, concentraciones de contaminantes o simplemente el caudal escurrido tampoco son variables continuas.

La no continuidad espacial del fenómeno genera inconsistencias en los sistemas de Kriging. La forma más sencilla de abordar el problema es igualando a 0 todos los pixeles con magnitudes negativas o valores incongruentes. También se puede establecer un umbral de precipitación para caracterizar espacialmente las precipitaciones nulas. Sin embargo, la simulación condicional es un método geoestadístico que brinda una solución confiable.

Un ejemplo común para introducir la simulación condicional es un problema presentado por Alfaro (1979) donde se pretendía medir, con un cable, el perfil del lecho marino de una costa a otra. Se usó un bote con sonar para obtener muestras del perfil e interpolarlas (Figura 5.3a). La interpolación lineal de Kriging arrojó una longitud estimada de 945 m (Figura 5.3b). Sin embargo, se determinó que el perfil real tiene una longitud de 1,182 m (Figura 5.3c). La dependencia entre la longitud de una curva y la escala de medición empleada es un aspecto fundamental que dió génesis a la teoría de fractales (Mandelbrot, 1975; Mandelbrot, 1977; Mandelbrot, 1982). La idea de la simulación condicional es construir representaciones del fenómeno observado, consistentes con los datos muestreados a gran escala (e.g: 1 km), que produzcan fluctuaciones locales a una escala menor (e.g: 1 m). Claramente, la simulación condicional no es una formulación de la realidad sino una posible versión entre millones. Para el caso planteado en Alfaro (1979), la simulación condicional estimó una longitud de 1,154 m, valore muy cercano al real (Figura 5.3d).

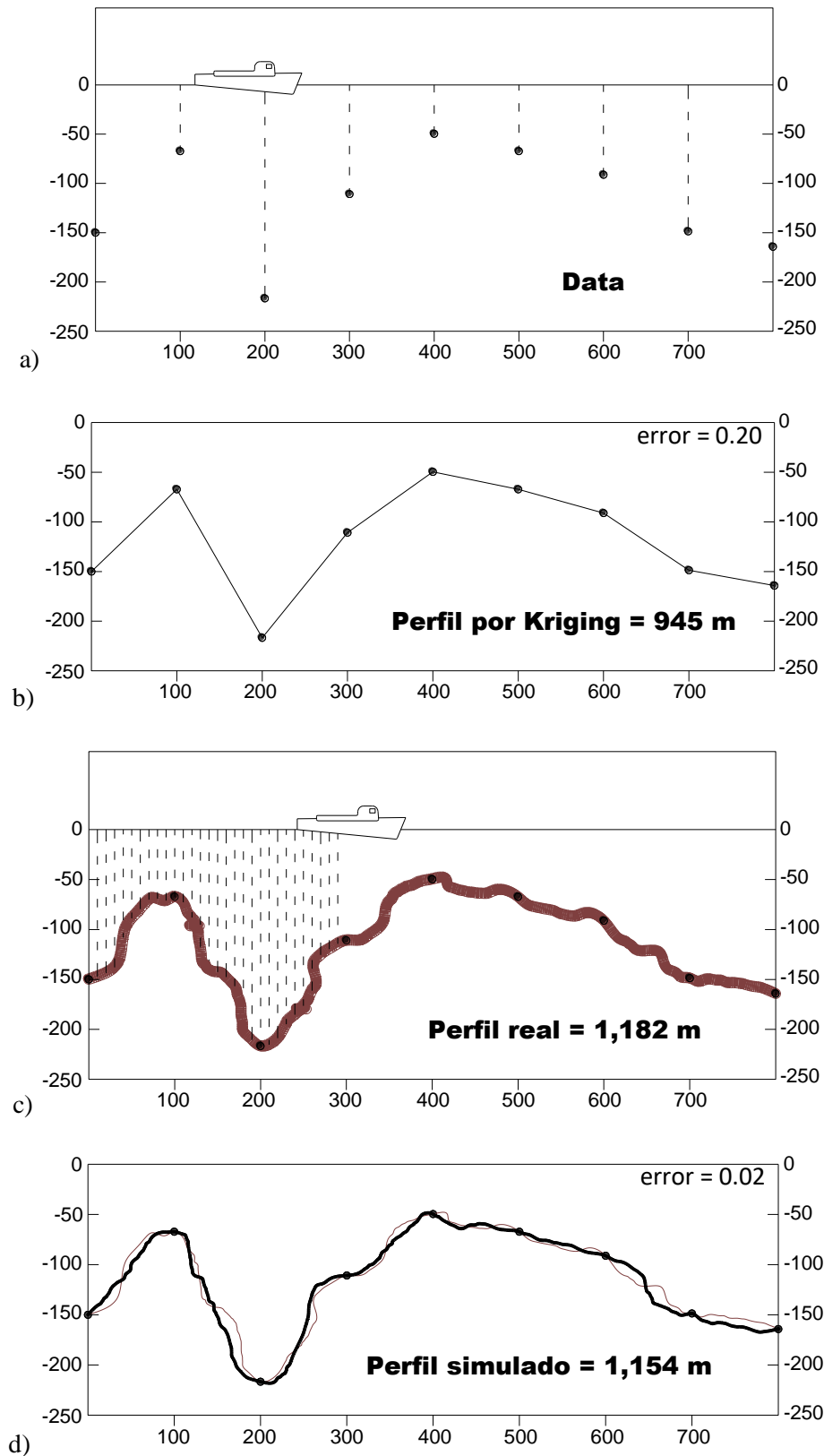


Figura 5.3 Ilustración del problema de Alfaro (1979): a) muestreo de la profundidad del lecho marino a cada 100 m; b) estimación del lecho marino por Kriging; c) perfil real y d) simulación condicional basada en los muestreos a cada 100 m (Fuente: Chilès & Delfiner, 2012).

Simulación libre y condicional

Una simulación libre (o no condicional) de una función aleatoria $\{V(x): x \in \mathcal{R}^n\}$ es simplemente una realización de $V(x)$ seleccionada aleatoriamente de muchas posibles realizaciones, de tal forma que la variable regionalizada $\{v(x): x \in D \subset \mathcal{R}^n\}$ observada en los puntos $\{x_i: i = 1, 2, \dots, n\}$ pueda ser considerada una realización de $V(x)$. Su construcción requiere conocimiento de la distribución espacial de la función aleatoria $V(x)$ por lo menos intrínsecamente (Chilès & Delfiner, 2012). Lo anterior supone un problema: su distribución finita nunca puede ser inferida de los datos muestreados, incluso mediante supuestos estacionarios. La mejor opción es obtener distribuciones bivariadas y, si es posible, algunas distribuciones multivariadas sólo si existe información suficiente.

Considerando una definición de orden 2: una simulación libre de una función aleatoria $V(x)$ es una realización de una función aleatoria $S(x)$ seleccionada de muchas posibilidades con los mismos momentos de segundo orden que $V(x)$. Esto implica tener la misma covarianza, variograma o covarianza generalizada. Así, la función aleatoria $S(x)$ tiene un número infinito de realizaciones.

En los sitios aforados, algunas de las funciones aleatorias $S(x)$ asumirán el mismo valor observado. Dichas simulaciones, se pueden considerar como la mejor representación de la variable regionalizada $v(x)$. De esta forma, una simulación condicional es una realización aleatoria seleccionada de un subconjunto de realizaciones que respetan los valores observados en sitios con medición. En otras palabras, es una realización de una función aleatoria con una distribución espacial condicionada (Chilès y Delfiner, 2012).

Modelos de campos aleatorios

El resultado de un procedimiento de simulación condicional será un campo aleatorio (CA) que respeta la función de distribución de probabilidad empleada para generarlo (Figura 5.4). Las características principales de los CAs son descritas en los párrafos siguientes.

Modelos difusos: Las simulaciones son funciones continuas. Hacen alusión a la difusión física, es decir, el lento proceso por el cual las moléculas se dispersan uniformemente. El caso más común es el CA Gaussiano.

Modelos de salto: las simulaciones son secuenciales y progresivas por saltos aleatorios en el dominio espacial. Los modelos más comunes son el salto aleatorio de Poisson y las funciones de dilución aleatorias.

Modelos de mosaico: el espacio simulado es dividido en secciones en las cuales la simulación es constante. Los valores de varias secciones son estimados independientemente de la misma distribución. Los casos comunes son los polígonos de Voronoi y los puntos de Poisson basados en poliedros.

Modelos de conjuntos aleatorios: La simulación asume valores únicamente de 0 y 1. Es también conocida como simulación binaria o experimentos de tipo Bernoulli. El caso común es la simulación Boleana por localización independiente de conjuntos aleatorios.

La Tabla 5.2 resume las características generales de los métodos de simulación condicional, su ergodicidad en \mathcal{R} , el modelo de CA, la covarianza empleada (Tabla 5.1), requerimientos de la malla de interpolación y el método de condición.

Tabla 5.2 Características principales de los métodos de simulación condicional. Fuente: [Chilès y Delfiner \(2012\)](#).

Modelo de Simulación	\mathcal{R}^n	Modelo CA	Covarianza	Req. de malla	Método de condición
Gaussiano secuencial	$\forall n$	Gaussiano	$\forall C$	No	Directo
Matriz de descomposición	$\forall n$	Gaussiano	$\forall C$	No	Directo
Bandas turnantes	$n > 1$	Gaussiano	$\forall C, \gamma, K$	No	Kriging
Autoregresión	$n = 1, 2$	Gaussiano	$C \text{ exp}$	Sí	Kriging
Medias móviles	$n = 1, 2$ $n > 2$	Gaussiano	$\cong \forall C \text{ con rango corto}$	Sí	Directo Kriging
Dilusión	$n = 1$ $n > 1$	Salto	$\cong \forall C, \gamma, K$ $\cong \forall C$	No	Iterativo
Hiperplanos de Poisson	$n > 1$	Salto	$\cong \forall \gamma, K$	No	Iterativo
Espectral continuo	$\forall n$	Gaussiano	$\forall C, \gamma, K$	No	Kriging
Espectral discreto	$n = 1$ $n > 1$	Gaussiano	$\cong \forall C, \gamma, K$ $\forall C \text{ rango finito}$	Sí	Kriging
Indicadores secuenciales	$\forall n$	Discreto	Indicador C	No	Directo
Gaussiano truncado	$\forall n$	Discreto	$C \text{ especial}$	No	Iterativo
Voronoi	$\forall n$	Mosaico	$C \text{ específica}$	No	Iterativo
Poliedros de Poisson	$\forall n$	Mosaico	$C \text{ exp}$	No	Iterativo
Sustitución	$\forall n$	Discreto	$C \text{ particular}$	No	Iterativo
Boleanos	$\forall n$	Binario	$C \text{ específica}$	No	Iterativo

Método de bandas turnantes

El método de bandas turnantes (TBM, por sus siglas en inglés) fue usado para describir el movimiento de partículas a través de funciones Brownianas aleatorias ([Chentsov, 1957](#)). Sus principios fueron generalizados más tarde por Matheron ([1973](#)). Se ha empleado en el campo de la hidrología para estudios de infiltración y precipitación ([Mantoglou & Wilson, 1982](#); [Lepioufle, 2009](#); [Lepioufle, Leblois y Creutin, 2012](#); [Chen, 2018](#)).

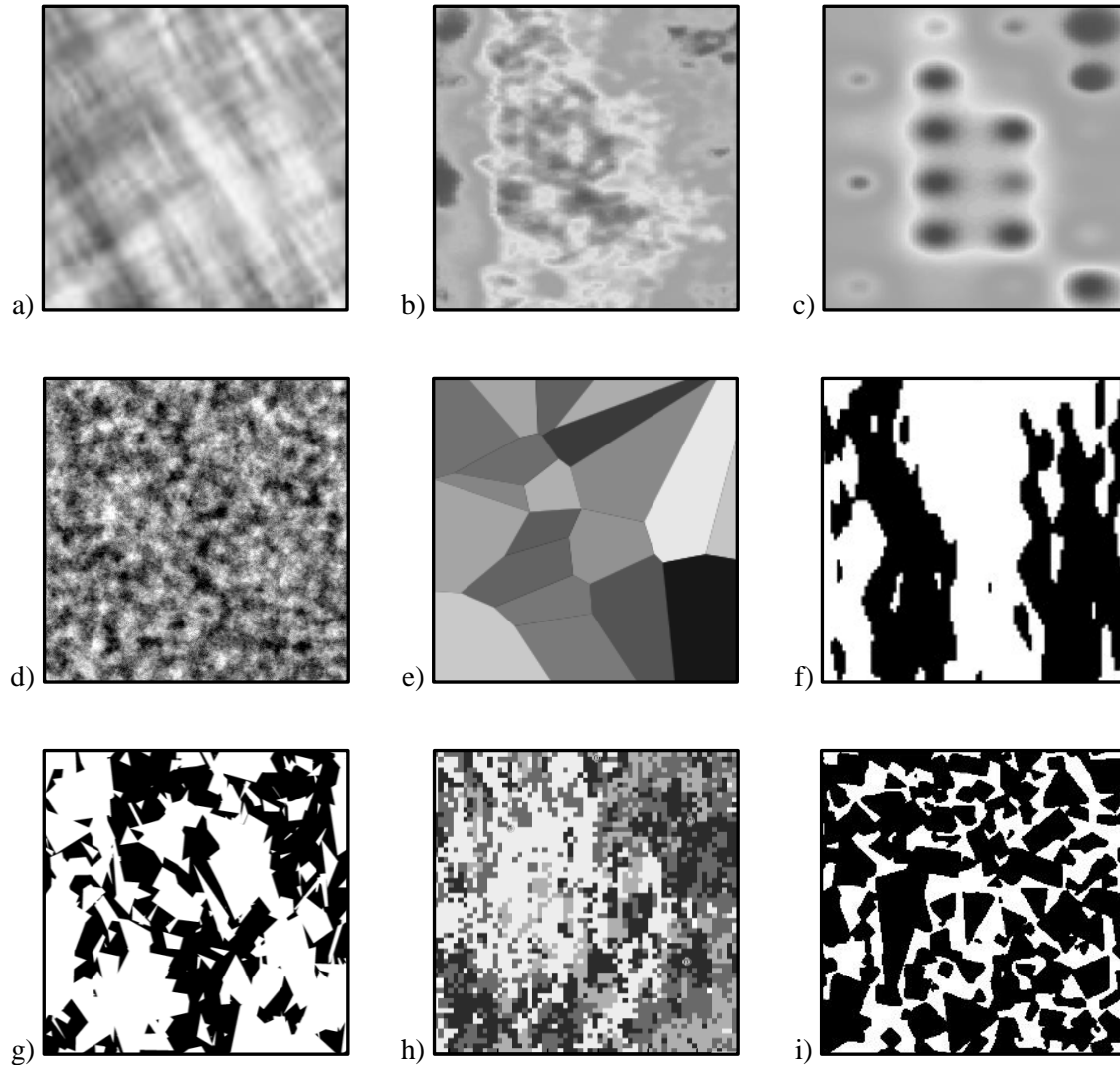


Figura 5.4 Ejemplos de CAs: a) espectral básico; b) dilución por función isotrópica; c) dilución por discos aleatorios; d) Gaussiano; e) mosaico con partición por polígonos de Poisson; f) Gaussiano truncado; g) mosaico por conjuntos aleatorios; h) indicador secuencial e i) poliedros de Poisson.

Este método puede ser empleado para funciones aleatorias estacionales (FAE) e intrínsecas (FAI). Consiste en sumar los valores numéricos de simulaciones independientes definidas en líneas que emanan del centro del dominio \mathcal{R} y atraviesan todo el espacio. Es decir, el valor de la simulación en un punto x_i del plano es la suma de los valores ortogonales proyectados sobre la línea o banda (Figura 5.5).

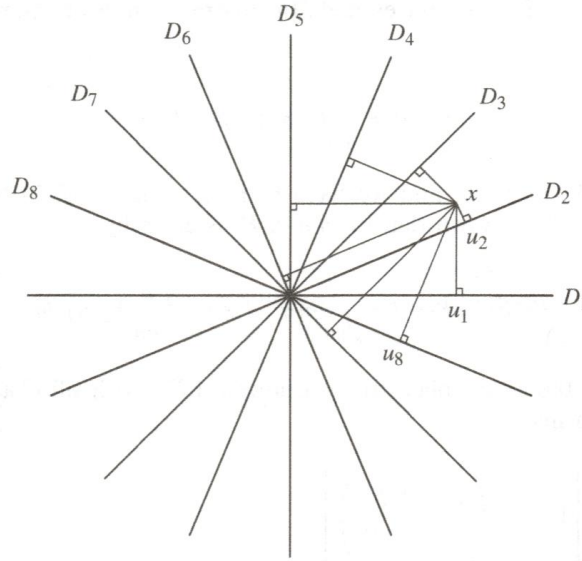


Figura 5.5 Principio de bandas turnantes en 2D. Fuente: [Chilès y Delfiner \(2012\)](#).

Considerando un sistema de n_D líneas que emanan del origen del espacio y escanean el plano de manera regular, el ángulo entre dos líneas adyacentes es π/n_D (Figura 5.5). Entonces, se define lo siguiente:

- $\theta_t \in [0, \pi[$ es el ángulo de la línea D_t con el eje de las abscisas.
- u_t es el vector unitario de D_t con componentes $\cos \theta_t$ y $\sin \theta_t$.
- s_t representa la abscisa en D_t centrada al origen.
- $S_t(s_t)$ son simulaciones libres independientes con covarianza $C_1(h)$ asociadas a las líneas D_t .

Al considerar un punto cualquiera en el espacio $x(x_i, y_i)$ su proyección en D_t es el punto con abscisa $s_t = x_i \cos \theta_t + y_i \sin \theta_t$. Por tanto, la simulación en el punto x es:

$$S(x) = \frac{1}{\sqrt{n_D}} \sum_{t=1}^{n_D} C_1(h, u_t) \quad \text{Ec. 5-33}$$

SAMPO

Simulation of Advected Mesoscale Precipitations and their Occurrence (SAMPO) es una herramienta informática geoestadística que permite realizar simulaciones condicionales de campos de lluvia ([Leblois & Creutin, 2013](#)). Las ocurrencias de lluvia, el volumen de precipitación total y un modelo de lluvia homogéneo son empleados en diversos modelos estocásticos de lluvia ([Chen, 2018](#)). Sin embargo, han sido modelados bajo diferentes perspectivas estocásticas (e.g: modelos de Markov) ([Bárdossy & Plate, 1991](#); [Brein, Turkington y Stowasser, 2015](#)).

SAMPO integra la generación de CAs Gaussianos y TBM en tres dimensiones (3D) para generar campos advectivos homogéneos de precipitación intermitente a una escala temporal diezminutaria. Suponga que se desean tres realizaciones gaussianas (S_1, S_2, S_3) para generar un campo aleatorio por TBM 3D (Figura 5.6). Esto implica trazar tres bandas turnantes que atraviesen el dominio pasando por el centro C . Considere un punto con coordenadas $P_n(x_i, y_i, z_i)$ que se proyecta ortogonalmente sobre las bandas turnantes (Figura 5.6a). En la primera banda se realiza una simulación libre para obtener un valor (G_1) en la ortogonal al punto (Figura 5.6b). Una nueva simulación se realiza en la segunda banda turnante para obtener un segundo valor (G_n) en la ortogonal. Sin embargo, el valor gaussiano final en el punto P_n es igual a la suma $G_2 = G_1 + G_n$ (Figura 5.6c). Este procedimiento se realiza tantas veces como bandas turnantes se deseen para cada punto del dominio espacial hasta tener un campo gaussiano uniforme (Y_I ; Figura 5.6d).

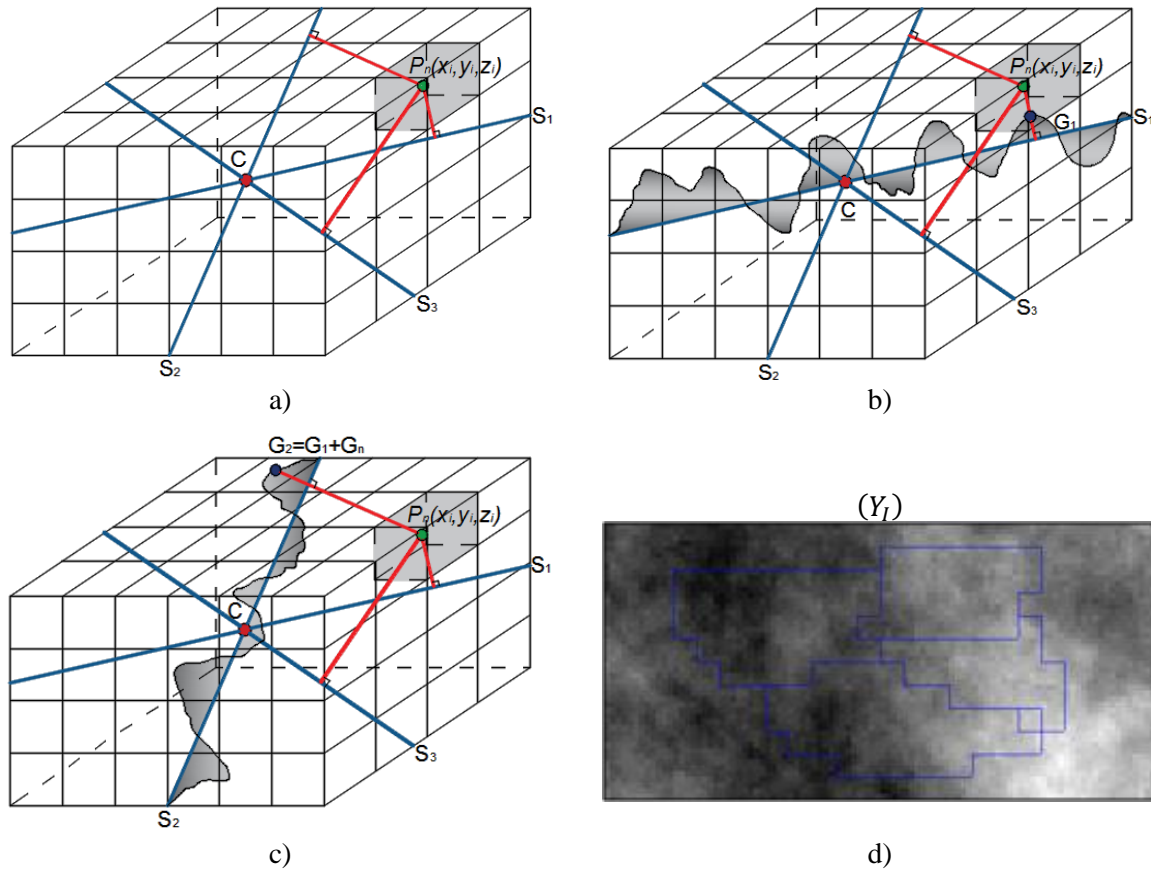


Figura 5.6 a) Tres bandas turnantes en un espacio 3D con un punto P_n proyectado en las bandas; b) simulación libre en la primera banda (S_1); c) simulación libre en la segunda banda (S_2) y d) campo gaussiano final.

Las series cronológicas de lluvia son divididas en dos: serie de precipitación nula ($P = 0 \text{ mm}$) y no nula ($P > 0 \text{ mm}$). Se determina la fracción de precipitación nula (q_0) y no nula ($1 - q_0$) del total de días en la serie. La delineación de la intermitencia de la lluvia está expresada como:

$$I(x, t) = 1_{Y_I(x, t) \geq \lambda} \quad \text{Ec. 5-34}$$

Donde: $I(x, t)$ es la intermitencia de la lluvia para el tiempo t ; 1 es una función binaria que es igual a 1 donde ocurre la precipitación y 0 si no llueve y λ es el cuantil gaussiano correspondiente a la fracción de área seca.

De esta forma, se obtiene una capa binaria que representa la intermitencia de la lluvia en el dominio (Figura 5.7b). Cabe señalar que el valor inicial de del cuantil gaussiano es $\lambda = G^{-1}(q_0)$, es decir, la probabilidad de no excedencia de una función de distribución acumulada gaussiana. Sin embargo, este cuantil se compara con el área donde $I(x, t) = 0$ de la imagen binaria. Si el área no corresponde al valor de la fracción de precipitación nula (q_0), se modifica su valor por iteración hasta ajustar el campo gaussiano (Figura 5.7a).

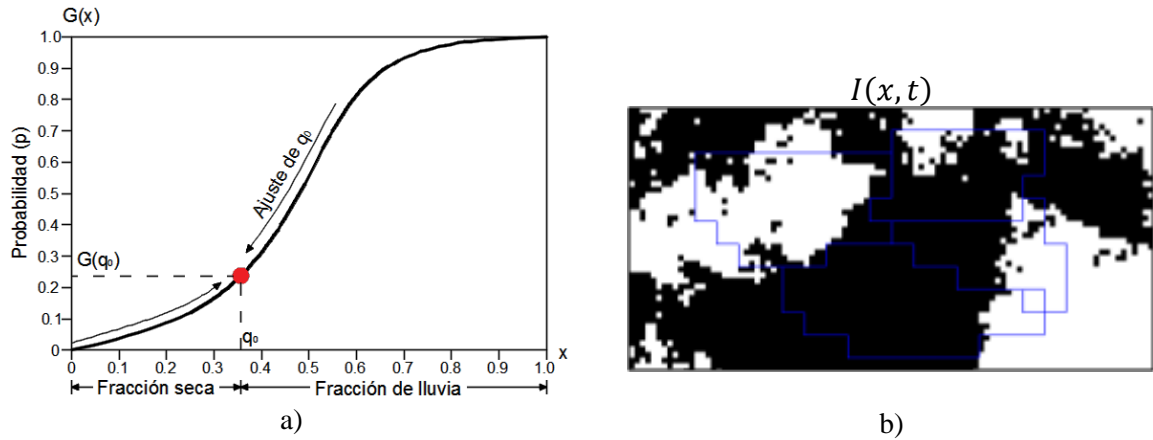


Figura 5.7 a) Ajuste gaussiano de la fracción de precipitación nula (q_0); b) imagen binaria de intermitencia de lluvia.

Por otro lado, se genera un campo gaussiano condicionado a los valores de la precipitación no nula por cualquier método geoestadístico de Kriging (Y_R). De esta forma se cuenta con una superficie homogénea de la precipitación donde no se tiene la influencia de precipitaciones nulas.

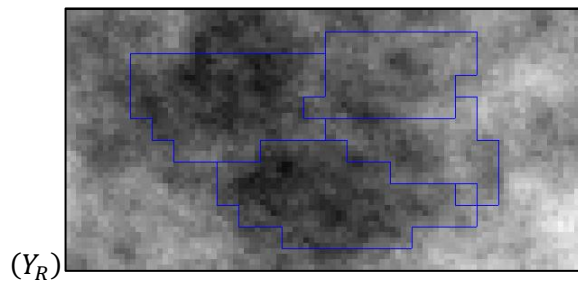


Figura 5.8 Interpolación de la precipitación no nula por Kriging ordinario.

Finalmente, la formulación general de los campos de intermitencia R_I propuesta por Leblois y Creutin (2013) se expresa como el producto de los campos Y_R e Y_I :

$$R_I(x_E, t) = \varphi(Y_R(x_L, t, U_R)) 1_{Y_I(x_L, t, U_I) \geq \lambda} \quad \text{Ec. 5-35}$$

Donde: Y_R e Y_I son dos funciones independientes gaussianas para representar el campo de precipitación no nula y la intermitencia con U_R y U_I mostrando su dinámica; φ es la anamorfosis de la distribución de probabilidad; λ representa la fracción de intermitencia; la combinación de las coordenadas Lagrangianas x_L y Euclerianas x_E explican el efecto de advección.

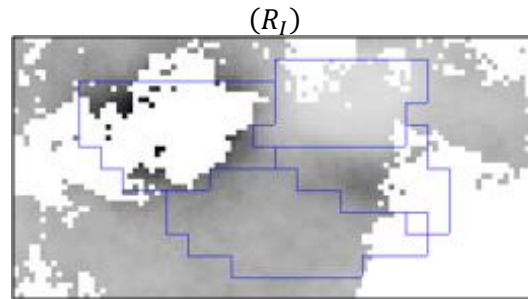


Figura 5.9 Simulación final de campo de lluvia intermitente.

El TBM depende de parámetros que describan la distribución de probabilidad en el área de interpolación (e.g: media, varianza y distribución log-normal III) y las propiedades espacio temporales de los sitios de medición (e.g: variograma espaciotemporal). La Figura 5.10 resume los pasos del método TBM 3D empleado para simular campos de lluvia intermitente en SAMPO.

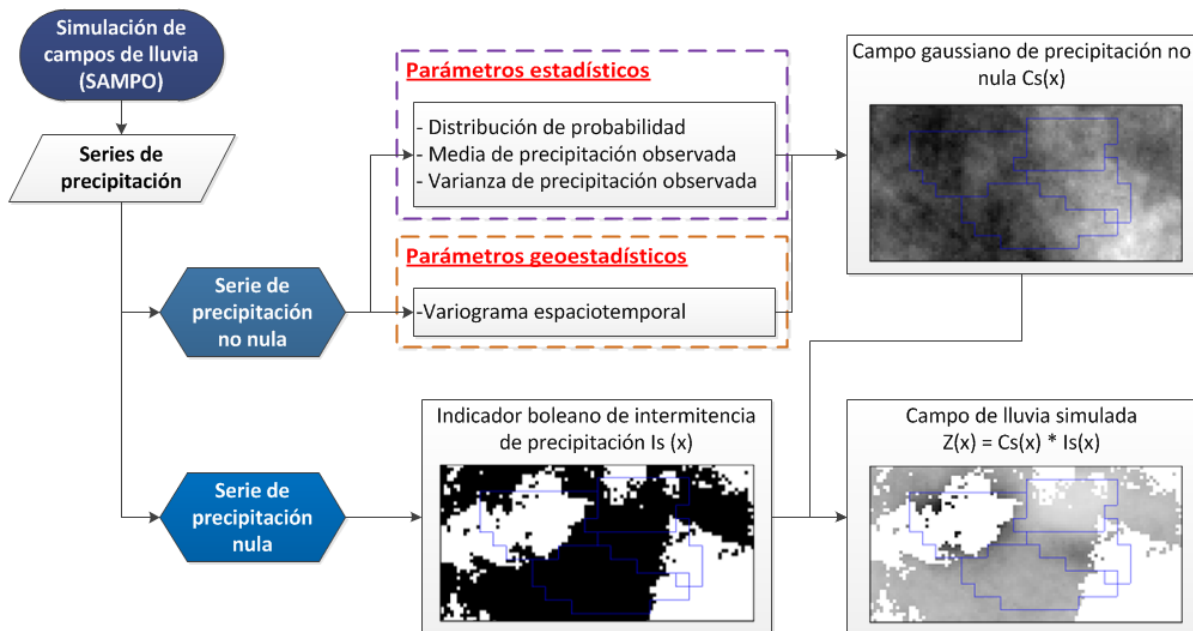


Figura 5.10 Diagrama general para generar campos advectivos homogéneos de precipitación intermitente $Z(x)$ en SAMPO por medio de un indicador booleano $Is(x)$ que muestra la intermitencia y un campo gaussiano de precipitación no nula $Cs(x)$.

5.2.7. Validación de las interpolaciones

Es común que los procesos de interpolación se validen por validación cruzada. El proceso consiste en sustraer una estación empleada en la generación de la superficie de interpolación ($Q_o(i)$). Con el modelo empleado para interpolar se estima nuevamente la magnitud de la variable en el punto donde se encontraba la estación sustraída ($Q_f(i)$). Finalmente, se mide la variación entre el dato observado y el dato estimado (Tabla 5.3). El proceso se repite hasta reemplazar el total de las estaciones utilizadas en la interpolación.

Tabla 5.3 Expresiones para medir las variaciones entre datos observados y estimados.

Estadísticos iniciales	
Media de valores estimados	$M_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_f(i)$
Media de valores observados	$M_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o(i)$
Error de estimación	
Bias	$B = M_f - M_o$
Error cuadrático medio	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2$
Varianza	$V = MSE - B^2$
Raíz del error cuadrático medio	$RMSE = (MSE)^{0.5}$
Error medio absoluto	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_f(i) - Q_o(i) $
Error medio absoluto relativo	$RMAE = \frac{MAE}{M_o}$
Eficiencia del modelo	
R^2	$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_f(i)Q_o(i) - M_f M_o)}{\left(\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o(i)^2 - M_o^2 \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_f(i)^2 - M_f^2 \right) \right)^{0.5}} \right]^2$
Índice de NASH	$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_f(i) - Q_o(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - M_o)^2}$

Donde: $Q_f(i)$ es el valor estimado; $Q_o(i)$ es el valor observado y n es el número de datos.

5.3. Interpolación de variables climáticas en México.

Las variables hidrológicas (e.g. temperatura, precipitación, evaporación), conforman un factor importante para la comprensión e interpretación de las respuestas ecológicas ante la alteración del caudal (Maheu, Poff, & St-Hilaire, 2016; O'Brien, 2018). La verificación de la calidad estadística en las observaciones hidrológicas constituye la primera etapa de cualquier estudio hidrológico y climático (Llamas, 1993). En México, existe evidencia de la selección de información climática por medio de pruebas de calidad de datos (Ouarda et al., 2008).

Con la finalidad de obtener superficies interpoladas de variables climáticas, se emplea un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) de una imagen SRTM (por sus siglas en inglés) con resolución de 250 m. La proyección empleada es Cónica Conforme Lambert con *datum* WGS 84. El DEM cuenta con 12,470 columnas y 8,192 filas, es decir, con más de 102 millones de píxeles para todo el país. La información climática se procesó e interpoló en Hydra-Eflow (Arévalo-Mejía et al., 2018).

5.3.1. Datos climáticos disponibles.

Los datos climáticos se obtuvieron de la base de datos de CLICOM (por sus siglas en inglés). La información se encuentra organizada en archivos con extensión *.csv y se dispone por entidad federativa a escala diaria y mensual. Los archivos con observaciones a escala diaria incluyen información relativa a: temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, evaporación, días con tormenta, días con granizo, días con niebla, cobertura nubosa y días con helada. La Tabla 5.4 muestra las variables, unidades y observaciones de las bases de datos de CLICOM.

Tabla 5.4 Información contenida en las bases de datos a escala diaria de CLICOM.

Clave	Variable	Unidades	Observaciones
001	Temperatura ambiente	°C	Lectura tomada a las 08:00 hs.
002	Temperatura máxima	°C	s/o **
003	Temperatura mínima	°C	s/o
005	Precipitación	mm/día	s/o
018	Evaporación	mm/día	s/o
030	Días con tormenta	días	0 no hay, 1 si hay
031	Días con granizo	días	0 no hay, 1 si hay
032	Días con niebla	días	0 no hay, 1 si hay
043	Cobertura nubosa	s/u *	0 despejado, 1 medio nublado, 2 nublado
091	Días con helada	días	0 no hay, 1 si hay

s/u* sin unidades.

s/o ** sin observaciones.

Las observaciones de cinco variables climáticas (temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación) fueron procesadas. Dicho procesamiento

consistió en: ordenar cronológicamente los registros, omitir lecturas repetidas e incluir un valor numérico en los días sin observación registrada. Para tal efecto, se programó un módulo en el lenguaje de cómputo técnico Matlab. Los resultados se almacenaron en archivos de texto (*.txt) y archivos tipo Matlab (*.mat).

La base de datos ordenada se compone por tres atributos: ‘fecha’, ‘lectura de la variable’ y ‘clave de la estación climática’. Las primeras tres columnas de la matriz de datos se reservan para el atributo ‘fecha’ (año, mes y día de la observación, respectivamente). Cada columna subsecuente corresponde al vector de datos del atributo ‘lectura de la variable’. Se asignó la ‘clave de la estación climática’ como primer dato de cada vector, excepto para las tres primeras columnas (ya que corresponden al atributo ‘fecha’). El año de inicio de registro corresponde al primer año en el que alguna de las estaciones, ubicadas en área analizada, haya comenzado a registrar datos climáticos. En caso de contar con días sin observación, se asigna el valor de -9999. La Tabla 5.5 muestra la integración de la base de datos para los últimos diez días del mes de agosto del año 1983 de cinco estaciones ubicadas en Aguascalientes para la variable de temperatura máxima.

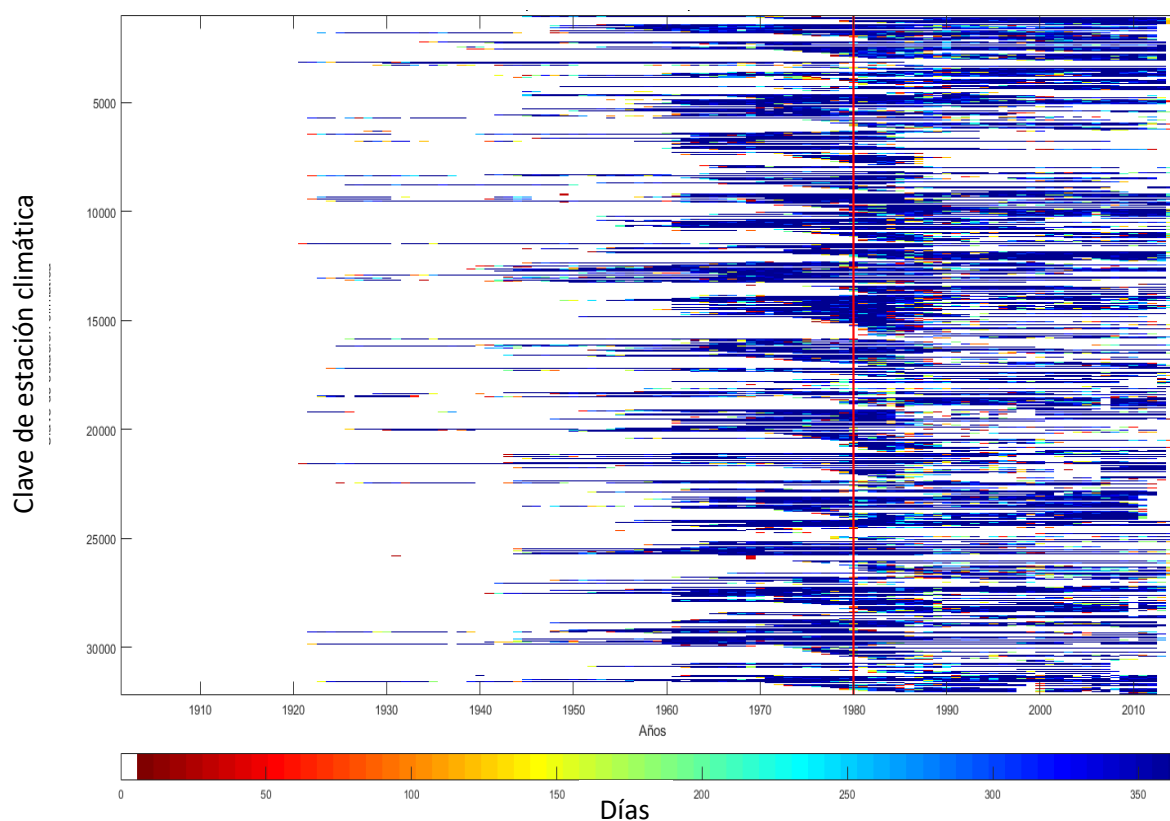
Tabla 5.5 Estructura de la base de datos CLICOM ordenada.

Año	Mes	Día	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5
0	0	0	1001	1003	1004	1005	1006
1983	8	22	27	30	28	28	29
1983	8	23	27	31	27	28	31
1983	8	24	28	32	27	28	31
1983	8	25	26	31	26	27	28
1983	8	26	28	31	27	27	31
1983	8	27	28	32	28	28	32
1983	8	28	29	32	29	29	32
1983	8	29	28	32	28	29	31
1983	8	30	27	31	28	27	29
1983	8	31	-9999	32	29	29	31

Se procesaron 5,500 estaciones climáticas, de las cuales, 3,163 estaciones (57.51%) se encuentran en operación y 2,337 estaciones (42.49%) suspendidas (ver Tabla 5.6). Se analizó la disponibilidad y porosidad de datos climáticos para seleccionar el periodo a interpolar. Dicho análisis se realizó mediante un módulo programado en Matlab. Se eligió el periodo de 1980 a 2012 para la interpolación de datos. De la Figura 5.11 a la Figura 5.15 se muestran los resultados de la porosidad de datos climáticos para México. Cabe resaltar que la disponibilidad de datos varía según la variable climática.

Tabla 5.6 Disponibilidad de estaciones CLICOM al año 2016.

Clave	RHA	Estaciones disponibles	Estaciones en operación	Porcentaje de operación
I	Península de Baja California	302	215	71.19
II	Noroeste	330	157	47.58
III	Pacífico norte	322	145	45.03
IV	Balsas	648	353	54.48
V	Pacífico sur	274	129	47.08
VI	Río Bravo	454	202	44.49
VII	Cuencas centrales del norte	307	250	81.43
VIII	Lerma-Santiago-Chapala	930	589	63.33
IX	Golfo norte	478	366	76.57
X	Golfo centro	559	229	40.97
XI	Frontera sur	387	214	55.30
XII	Península de Yucatán	238	162	68.07
XIII	Aguas del Valle de México	271	152	56.09
TOTAL		5,500	3,163	57.51

**Figura 5.11** Disponibilidad de datos de temperatura en México (estaciones CLICOM).

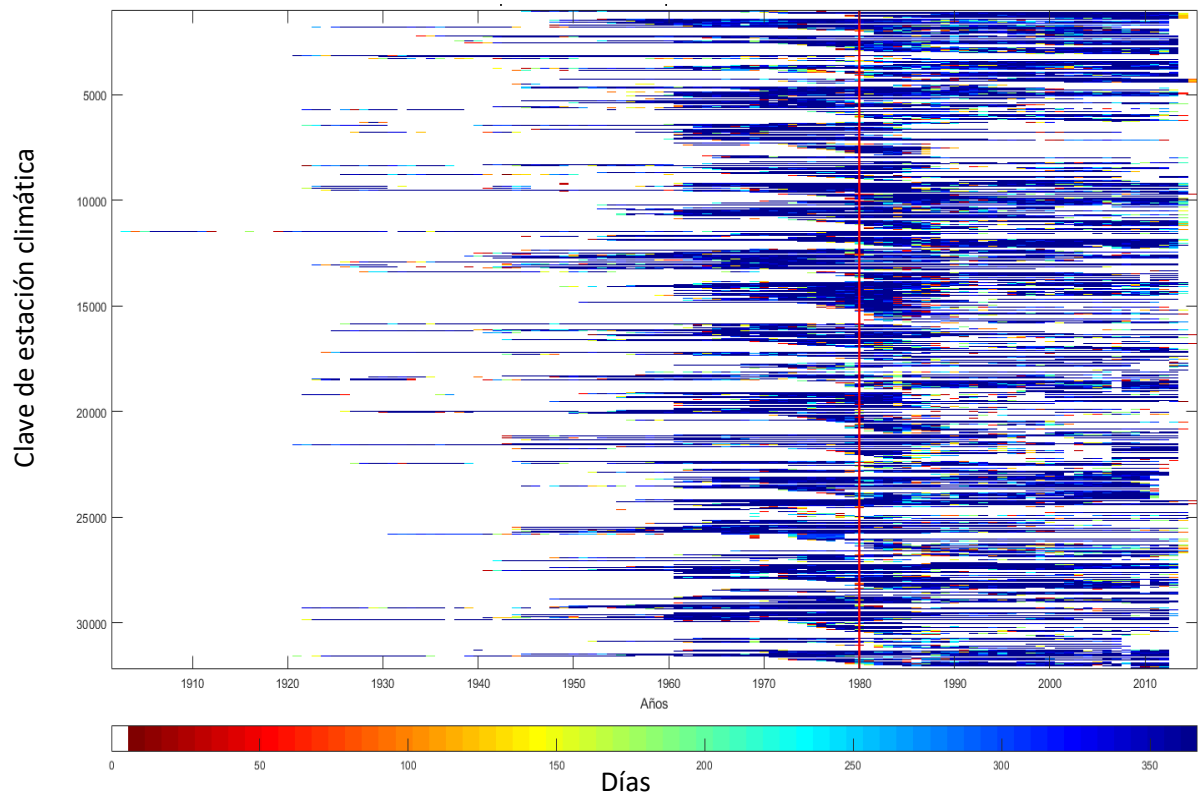


Figura 5.12 Disponibilidad de datos de temperatura máxima en México (estaciones CLICOM)

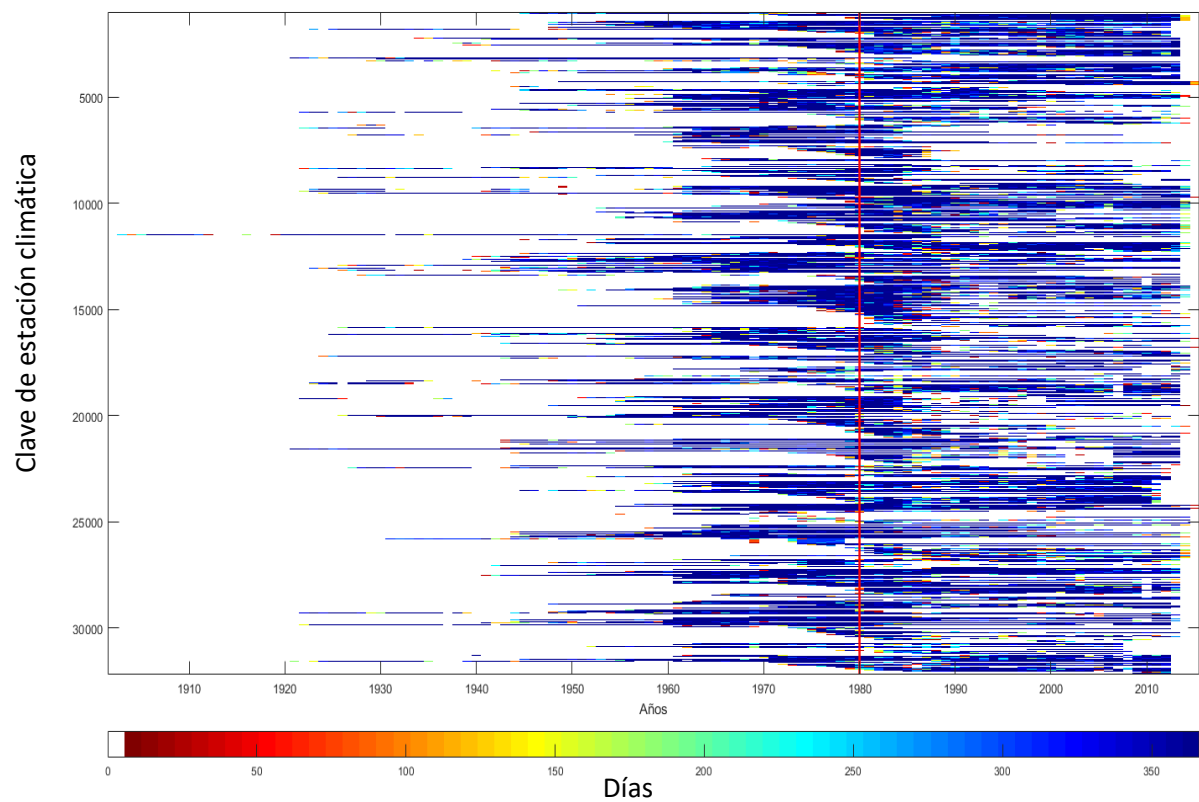


Figura 5.13 Disponibilidad de datos de temperatura mínima para México (estaciones CLICOM).

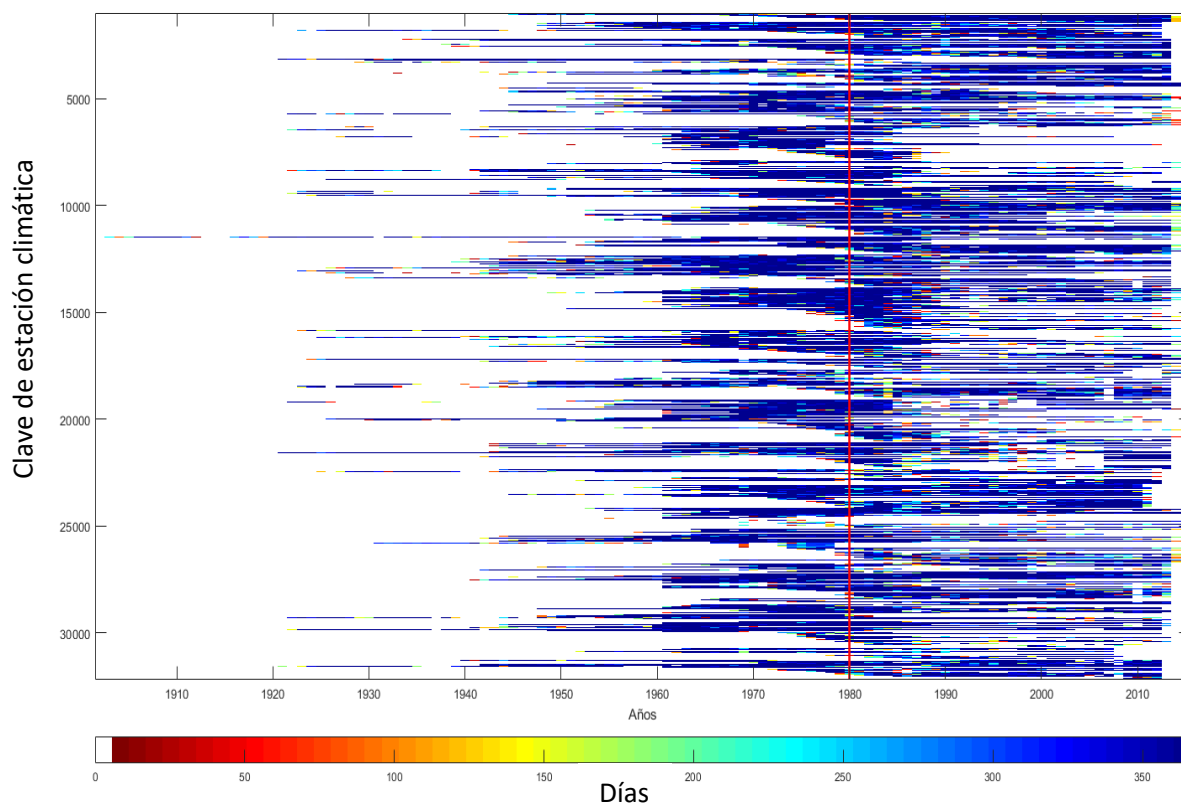


Figura 5.14 Disponibilidad de datos de precipitación en México (estaciones CLICOM).

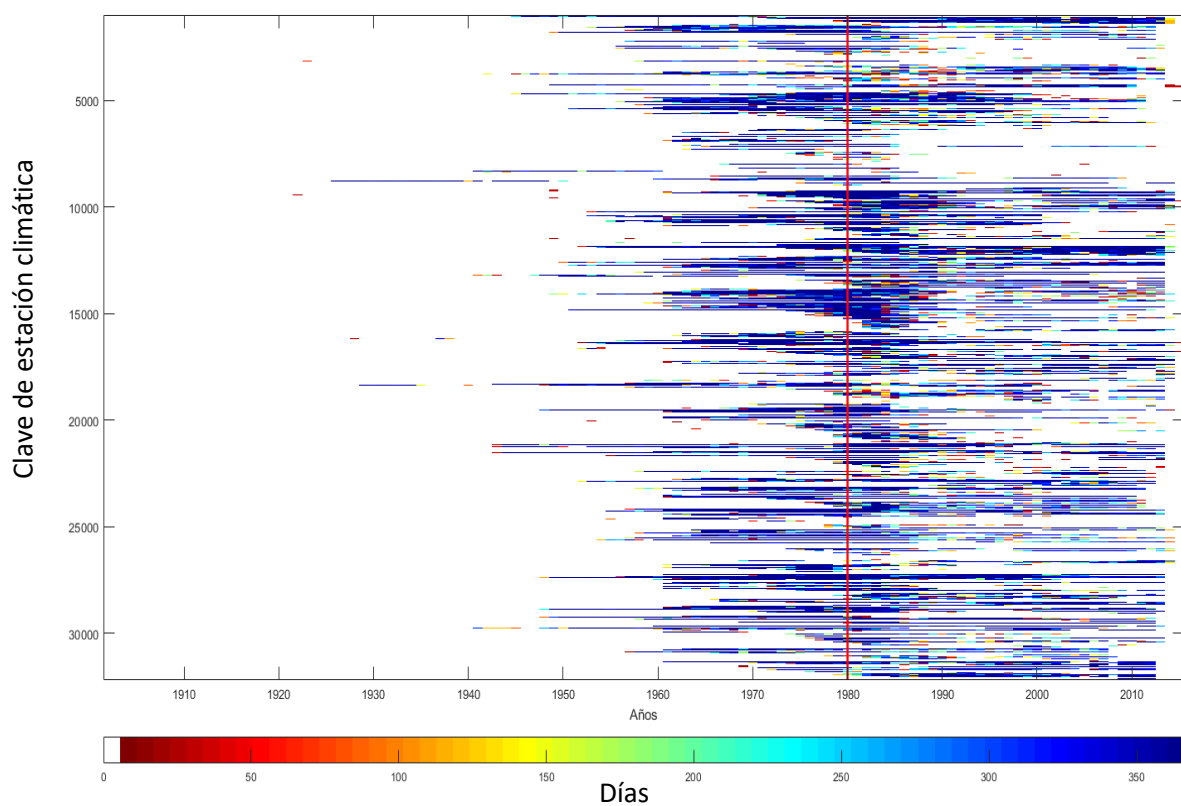


Figura 5.15 Disponibilidad de datos de evaporación en México (estaciones CLICOM).

Del análisis de disponibilidad de datos, se identificaron 242 estaciones climáticas que se encuentran dentro del catálogo CLICOM pero no tienen observaciones registradas en la base de datos (ver Anexo Digital). El periodo de 1980 a 2017, cuenta con 4,694 estaciones con registro de temperatura ambiente, máxima y mínima. Para la precipitación, se cuenta con 4,792 estaciones y 3,989 estaciones para la evaporación en tanque.

Se aplicaron las pruebas de Wald-Wolfowitz y de Correlación ordenada para verificar la independencia de la información climática. La homogeneidad se verificó mediante la prueba U de Mann-Whitney. Las pruebas estadísticas se realizaron para niveles de confianza del 95% y 99%. Para el caso de la prueba U de Mann-Whitney las series cronológicas fueron analizadas por medio de medias móviles para encontrar modificaciones en la secuencia de datos. Cuando los cambios fueron significativos, se separó el registro en el año de ruptura. En caso contrario, se dividió el registro en la mediana de la serie de datos (ver resultados en Anexo Digital). Se aceptaron las estaciones que aprobaron las pruebas de calidad con un nivel de confianza del 99%. Se obtuvieron: 3,614 estaciones con calidad para variables de temperatura ambiente, máxima y mínima. La precipitación presentó complicaciones por la cantidad de observaciones nulas (especialmente en la región del Bajío y parte norte de México). Se aceptaron 3,018 estaciones con calidad en precipitación. Finalmente, se aceptaron 1,715 estaciones que mostraron calidad estadística para observaciones de evaporación de tanque (Figura 5.16).

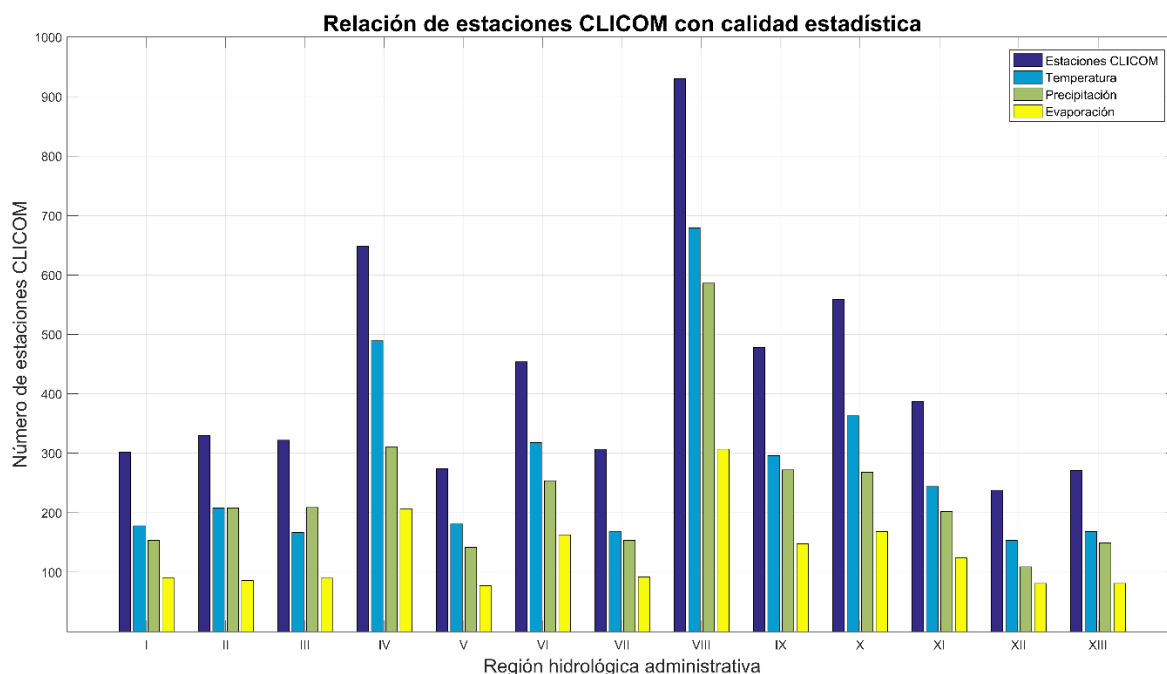


Figura 5.16 Relación de estaciones CLICOM con calidad estadística seleccionadas.

5.3.2. Análisis variográfico.

El análisis variográfico se realizó con tres propósitos: i) conocer la estructura espacial de las estaciones climáticas en México; ii) dar soporte al análisis de calidad de datos para identificar estaciones con valores singulares e iii) identificar efectos en el variograma por fenómenos naturales tales como El Niño Oscilación Sur (ENOS).

La estructura espacial de los datos climáticos en México se ajusta a modelos teóricos de variograma de tipo exponencial y circular. Las temperaturas muestran un comportamiento más estable durante el año. Por el contrario, se identifican dos grupos de estructura para los casos de precipitación y evaporación: época de estiaje y época de lluvias. La Figura 5.17 y la Figura 5.18 muestran los variogramas experimentales mensuales de las variables de temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación. Puede observarse la fluctuación interanual de la magnitud de cada variable.

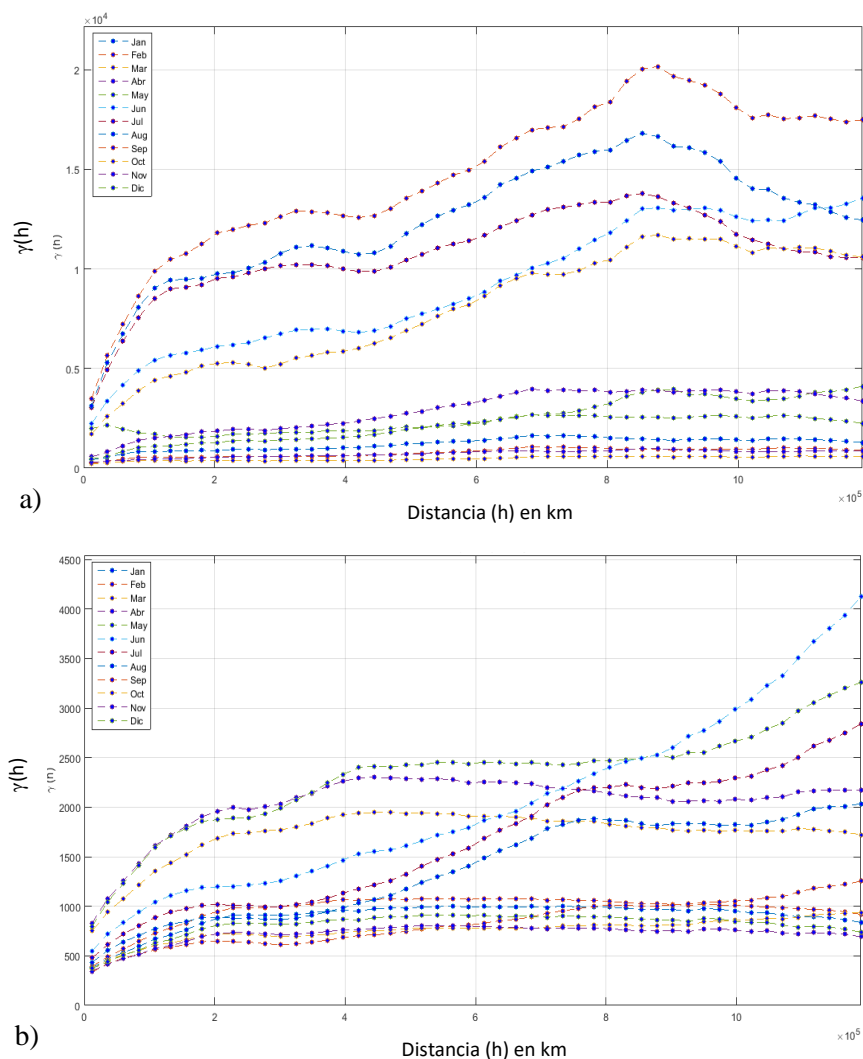


Figura 5.17 Variogramas experimentales mensuales para a) precipitación y b) evaporación.

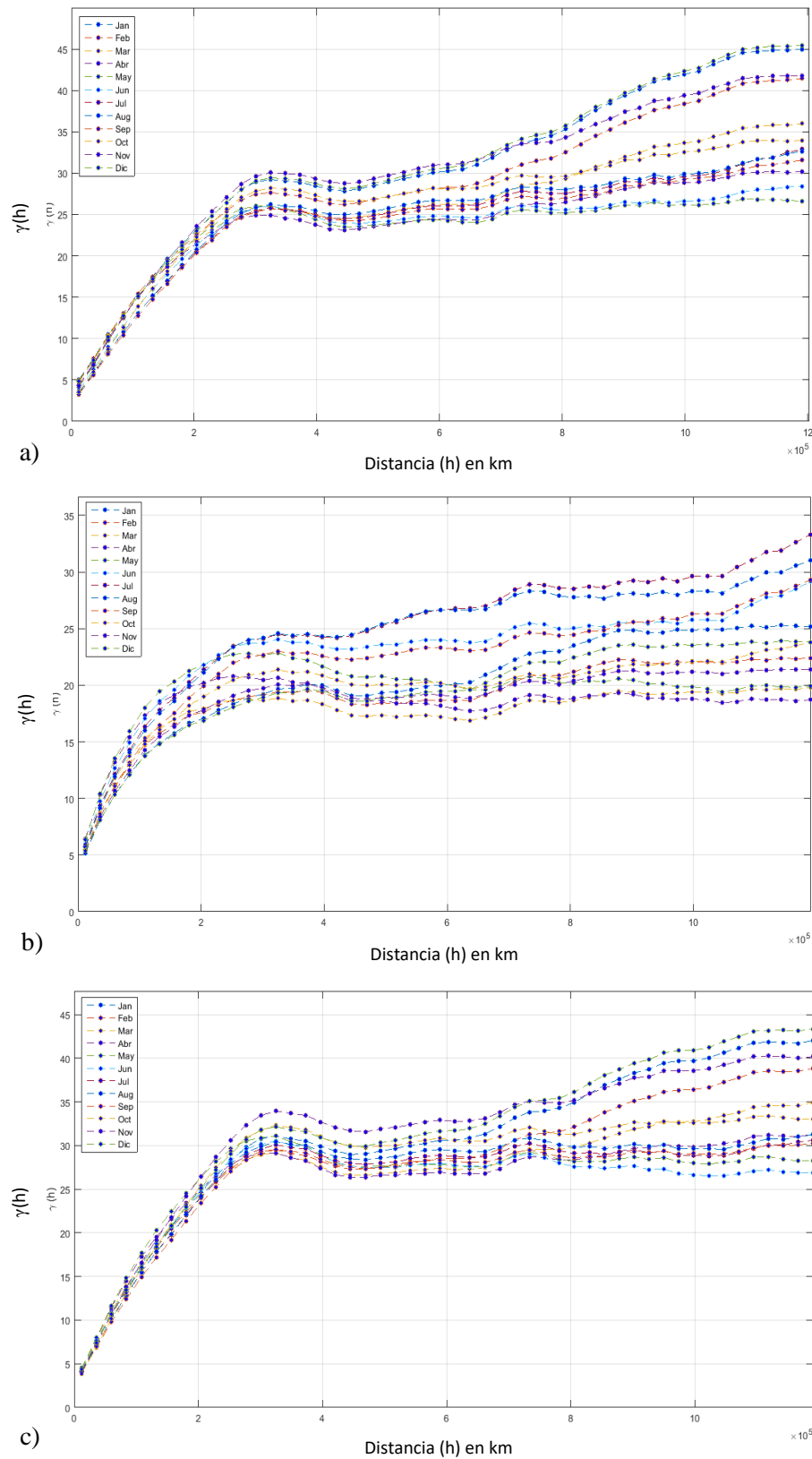


Figura 5.18 Variogramas experimentales mensuales para a) temperatura ambiente b) temperatura máxima y c) temperatura mínima.

El comportamiento homogéneo, en el caso de las temperaturas, permite emplear un sólo variograma regional de tipo exponencial (ver Tabla 5.1). Para la precipitación y evaporación el problema se resolvió mediante el uso de un sólo modelo de variograma en la simulación condicional. El análisis permitió identificar estaciones con errores en su ubicación geográfica. La altitud de las estaciones se verificó con el DEM. Se excluyeron 183 estaciones cuyas coordenadas geográficas no son consistentes con las coordenadas oficiales. Lo anterior puede deberse a: i) las estaciones han sido reubicadas, ii) el valor del píxel dado por el DEM suavizó la topografía local o iii) las coordenadas oficiales de las estaciones presentan errores de captura. El número total de estaciones por año oscila entre 2,251 estaciones a 2,433 estaciones para análisis de temperatura y entre 1,953 a 2,127 estaciones para precipitación.

Impacto del ENOS en la estructura espacial climática de México

El fenómeno natural de El Niño Oscilación Sur (ENOS) implica grandes intercambios de calor entre el océano y la atmósfera que afectan la temperatura media global de la Tierra. Dicho intercambio de calor crea situaciones extremas en el ciclo hidrológico como pueden ser lluvias torrenciales y sequías en diferentes partes del mundo (ITE, 2017). La Oscilación Sur se refiere a cambios en el sistema de presiones de las zonas subtropicales que afectan a la fuerza y dirección de los vientos alisios en el océano Pacífico. El fenómeno de El Niño hace referencia a cambios en la temperatura superficial del agua en la zona ecuatorial del Pacífico (Figura 5.19). El incremento de la temperatura de las aguas oceánicas se debe a que las aguas más calientes del Pacífico tropical, generalmente confinadas a la región del Pacífico del oeste, se esparcen a lo largo del ecuador y por tanto, las temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico central y del este son más elevadas (Magaña et al., 1997).

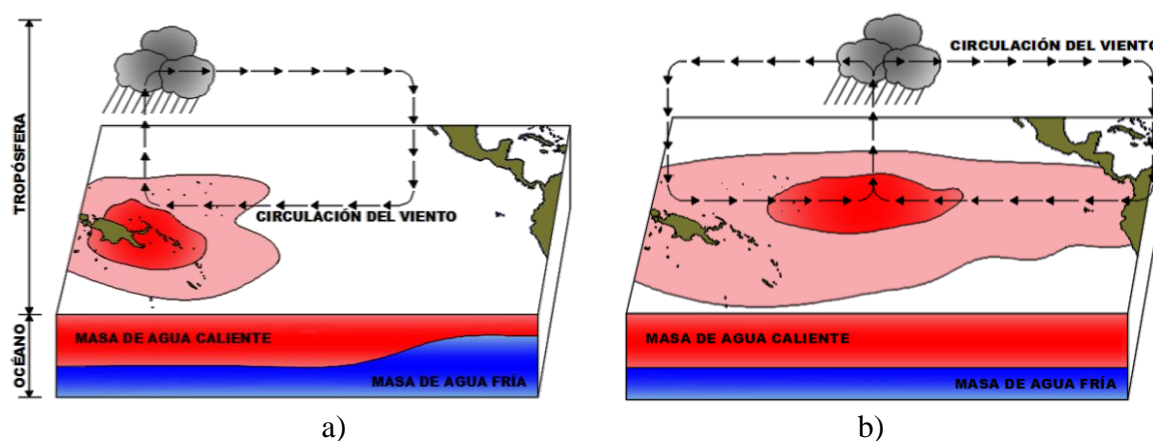


Figura 5.19 Condiciones de temperatura y corrientes de viento del océano Pacífico durante a) período típico y b) en presencia del fenómeno ENOS. Fuente: adaptado de Magaña et al. (1997).

En general, los años con presencia del ENOS tienden a crear un efecto cóncavo en el variograma. Lo anterior se puede explicar ya que el incremento de la temperatura en una región crea valores máximos locales y la curva desciende en función de la distancia de separación con la región caliente. Sin embargo, la concavidad no modifica la estructura de los variogramas experimentales, sino el valor del silo y el rango al que la varianza se vuelve constante. De esta forma, se preserva el modelo de variograma tipo exponencial para las interpolaciones de datos climáticos. La Figura 5.20 muestra los variogramas experimentales de temperatura mínima del mes de enero para los treinta años del periodo en estudio (1980-2012).

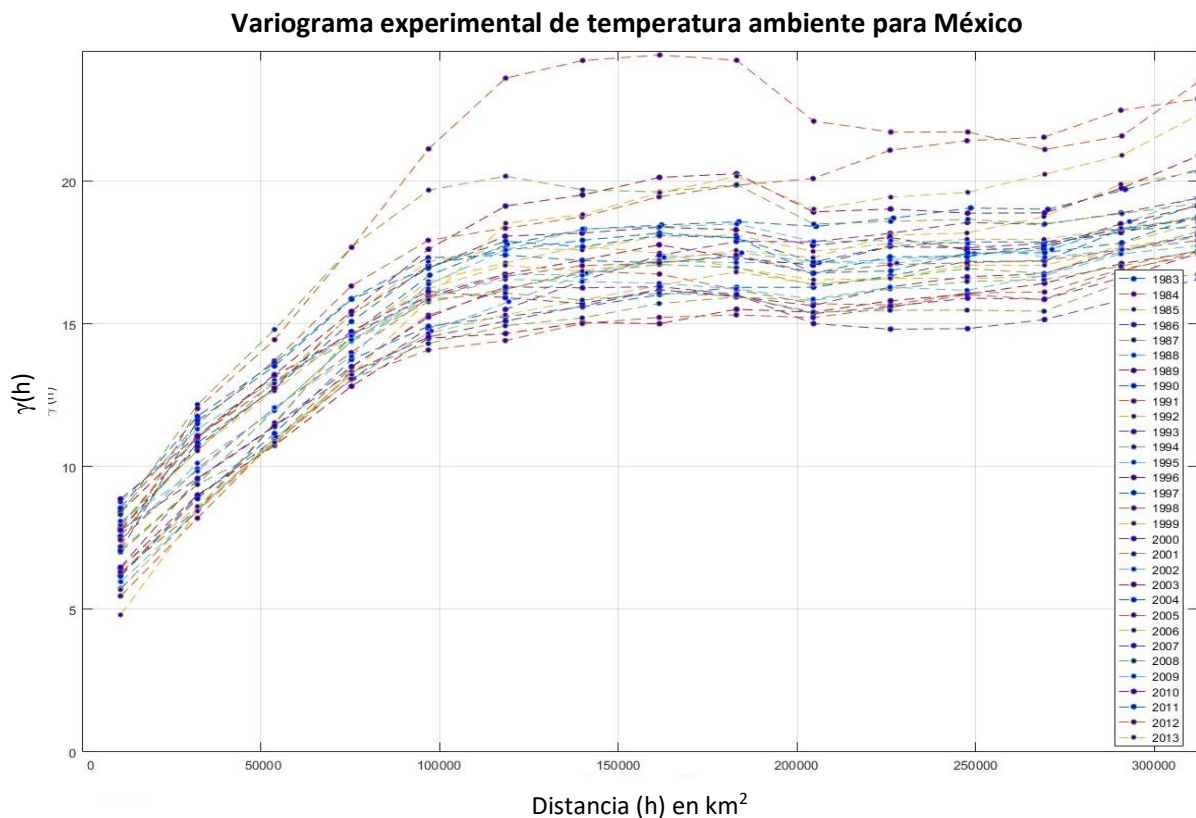


Figura 5.20 Variogramas experimentales del mes de enero para el periodo 1980-2012.

5.3.3. Interpolación de temperatura

Las variables de temperatura se interpolaron por el método de kriging con factor de cambio externo. Se hizo variar los valores estimados en función de la longitud, latitud y altitud de las estaciones climáticas seleccionadas. Los factores de cambio externo se extrajeron del DEM.

Las correlaciones lineales entre los factores de cambio externo y la temperatura reflejan los principios básicos de la climatología mexicana. Por ejemplo, para el mes de julio de 1980, la correlación con la longitud muestra una pendiente negativa, es decir, la temperatura en la costa oeste de México es de mayor magnitud que en la costa este (Figura 5.22). La correlación con la latitud muestra el incremento de la temperatura a mayor latitud por el altiplano mexicano.

Respecto a la altitud, se muestra su correlación negativa lo que indica el decremento de la temperatura al incrementar la altitud. Cabe mencionar que este ajuste se realiza automáticamente para cada imagen interpolada en Hydra-Eflow. Se realizó una regresión multivariable de primer orden con los factores de cambio seleccionados.

Los residuos, provenientes de la regresión multivariable, fueron empleados para generar los variogramas experimentales para la interpolación. La Figura 5.24 y Figura 5.25 muestran los variogramas experimentales mensuales para el periodo elegido (1980 – 2009). Se observa que los meses con mayor variabilidad de temperatura son enero, febrero, noviembre y diciembre. Este efecto también se puede apreciar en la nube de datos de la Figura 5.21 y Figura 5.22 para los meses mencionados. Sin embargo, la variación espacial y la estructura del variograma es preservada. Esto permite emplear un variograma regional único para las interpolaciones.

Previo al procedimiento de Kriging, la herramienta informática Hydra-Eflow realiza un filtro de estaciones climáticas. El filtro consiste de tres pasos:

1. **Análisis de ubicación geográfica:** compara la altitud geográfica proporcionada con la del DEM para localizar posibles errores que afecten la regresión multivariable. De no coincidir los datos, Hydra-Eflow acepta aquellas estaciones cuya altitud no sea mayor a dos desviaciones estándar del grupo local de estaciones.
2. **Análisis variográfico de datos:** este análisis permite identificar posibles valores que afecten la calidad de la interpolación. Se realiza una validación cruzada con los datos iniciales para estimar el error con el variograma seleccionado. Cada valor observado es comparado con el obtenido en la validación cruzada. Hydra-Eflow acepta aquellas estaciones cuyo error sea menor a dos veces la varianza de Kriging. Este análisis, o alguno similar, es empleado por otras herramientas informáticas con orientación geoestadística ([Hutchinson, 2008](#)).
3. **(Opcional) Reajuste variográfico:** si algunas estaciones climáticas son descartadas a través de cualquiera de los dos pasos anteriores, se efectúa un reajuste del variograma preservando la misma estructura (rango, silo y efecto pepita). Esto es posible ya que se demostró que los variogramas experimentales preservan la misma forma variando únicamente en el valor del silo (Figura 5.24 y Figura 5.25).

Posterior a la filtración de datos, se interpola por medio un barrido de ventanas móviles. También conocido como Kriging con vecino ([Isaaks y Srivastava, 1989](#)), la ventana móvil es una técnica que permite estimar el valor deseado considerando únicamente la variación local, es decir, sólo emplea las estaciones que caen dentro de la ventana móvil más una ventana de soporte. Esta técnica depende de una abundante concentración de estaciones para resultados confiables. La Figura 5.23 muestra dos estados del barrido de la ventana móvil. En el primer caso (Figura 5.23a), al estimar el valor en el punto 0 se consideran las estaciones 6 (ventana móvil) y 1 (ventana de soporte). Para el segundo caso, se considerarán las estaciones 1 y 2 (Figura 5.23a).

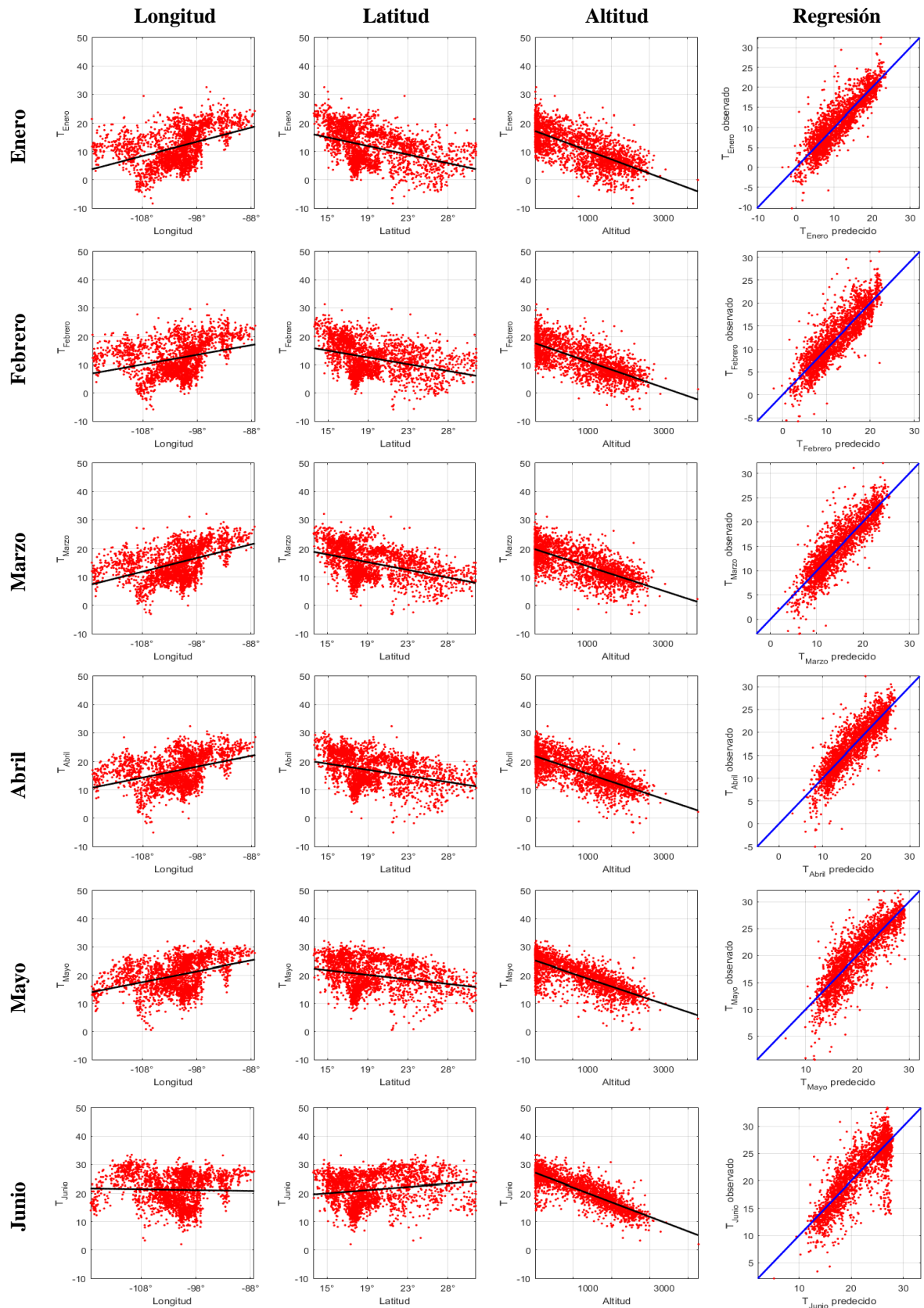


Figura 5.21 Resultados del análisis de factores de cambio externo de enero a junio: longitud, latitud, altitud y regresión multivariable (de izquierda a derecha).

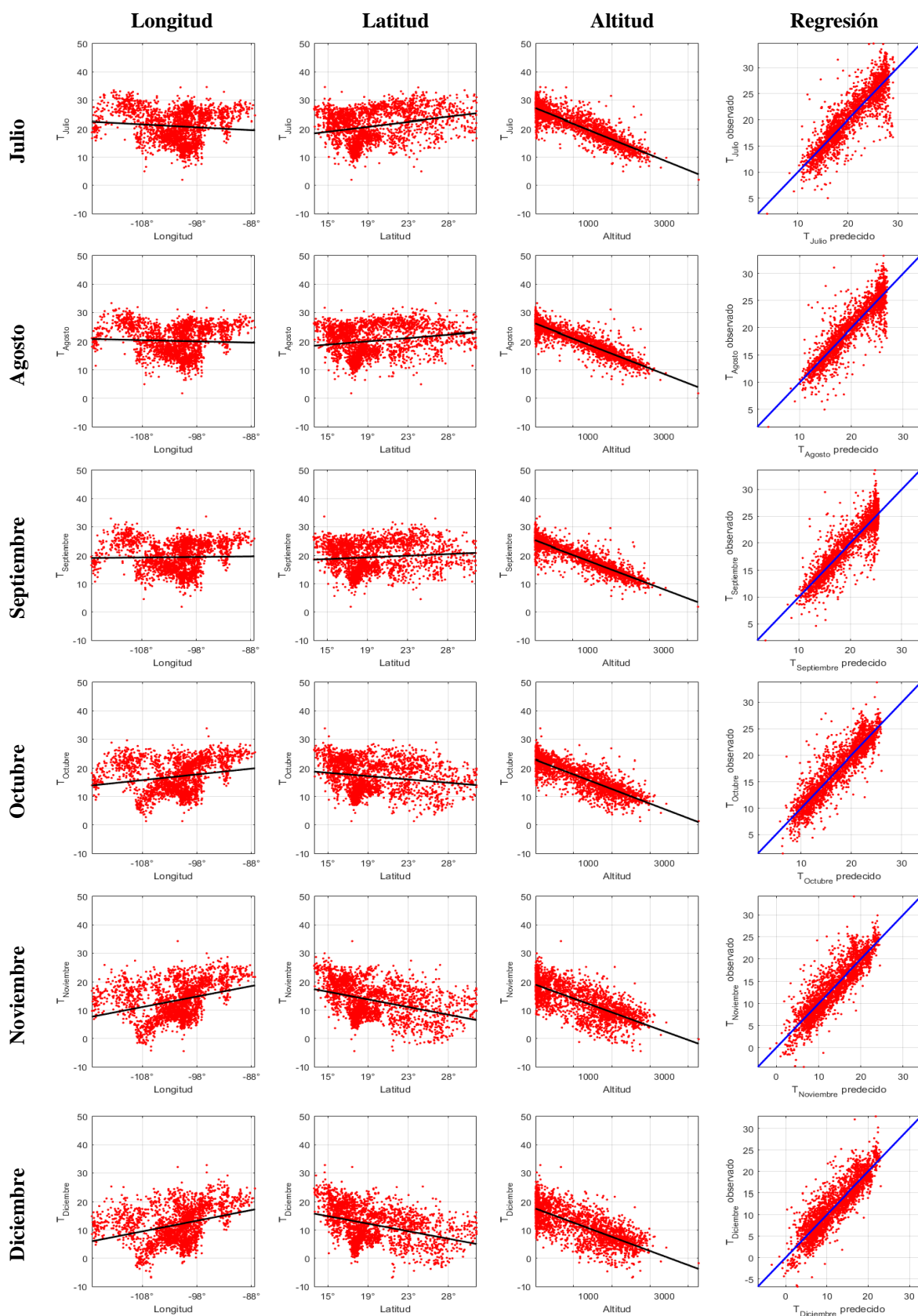


Figura 5.22 Resultados del análisis de factores de cambio externo de julio a diciembre: longitud, latitud, altitud y regresión multivariable (de izquierda a derecha).

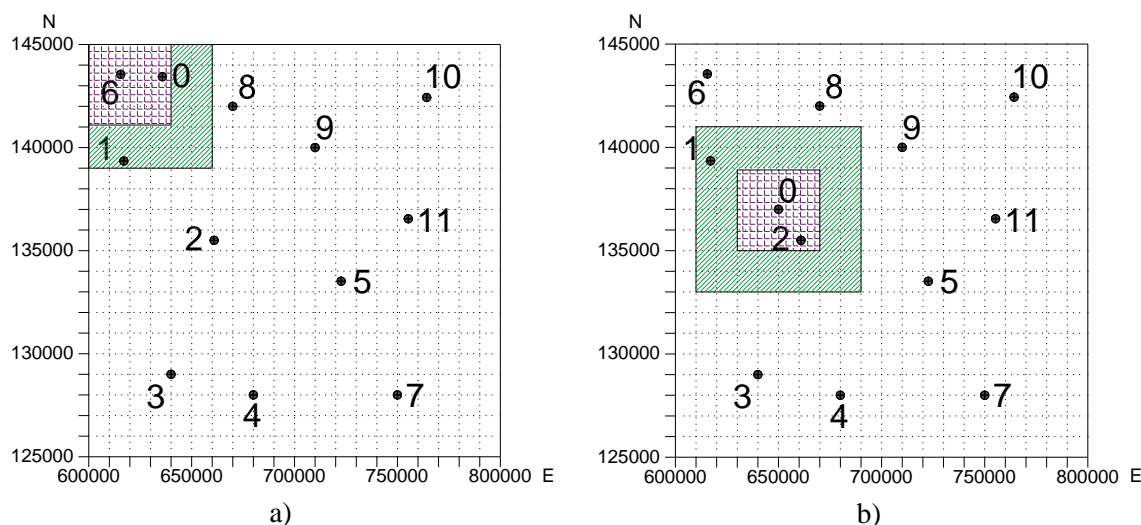


Figura 5.23 Barrido de Ventana móvil para interpolación (Kriging con vecino).

Los resultados de las imágenes son almacenados en formato binario (*.bin) para dato de punto-flotante con precisión de 32 bits (*single*). Hydra-Eflow permite transformar los datos de archivos binarios (*.bin) a archivos de formato ASCII de ESRI (*.asc). Los archivos con extensión *.asc pueden ser consultados en diferentes herramientas informáticas con orientación a los sistemas de información geográfica (SIG) como ArcGis, Qgis o TerrSet. Los variogramas generados son almacenados en formato *.png y los resultados de la validación cruzada en archivos tipo texto (*.txt).

Se cuenta con 936 imágenes mensuales para la temperatura ambiente, máxima y mínima con sus respectivas 936 imágenes de varianza. Cada par de imágenes cuentan con su respectivo variograma teórico y experimental. La validación se realizó por validación cruzada de acuerdo con lo indicado por Dubrule (1983). El error estadístico se obtuvo por medio del error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés), la raíz del error absoluto medio (RMAE) y el coeficiente de NASH (Tabla 5.3).

De la Figura 5.26 a la Figura 5.37 se muestran los resultados obtenidos para la variable de temperatura ambiente en el año de 1980. Se observa la fluctuación de la temperatura desde el mes de enero hasta diciembre. Cada mapa estimado es acompañado por su respectiva varianza de Kriging. Cabe señalar que los meses con mayor varianza son consistentes con la variabilidad mostrada en los variogramas de la Figura 5.24 y Figura 5.25. La Tabla 5.7 muestra los datos medios de los errores de interpolación para las variables de temperatura ambiente, temperatura mínima y temperatura máxima según: i) año interpolado, ii) número medio de estaciones empleadas en la interpolación (No. Est); iii) RMAE y iv) coeficiente de NASH. Los errores obtenidos son el resultado del proceso de filtrado de Hydra-Eflow, es decir, la diferencia entre los errores con los datos brutos y con datos filtrados.

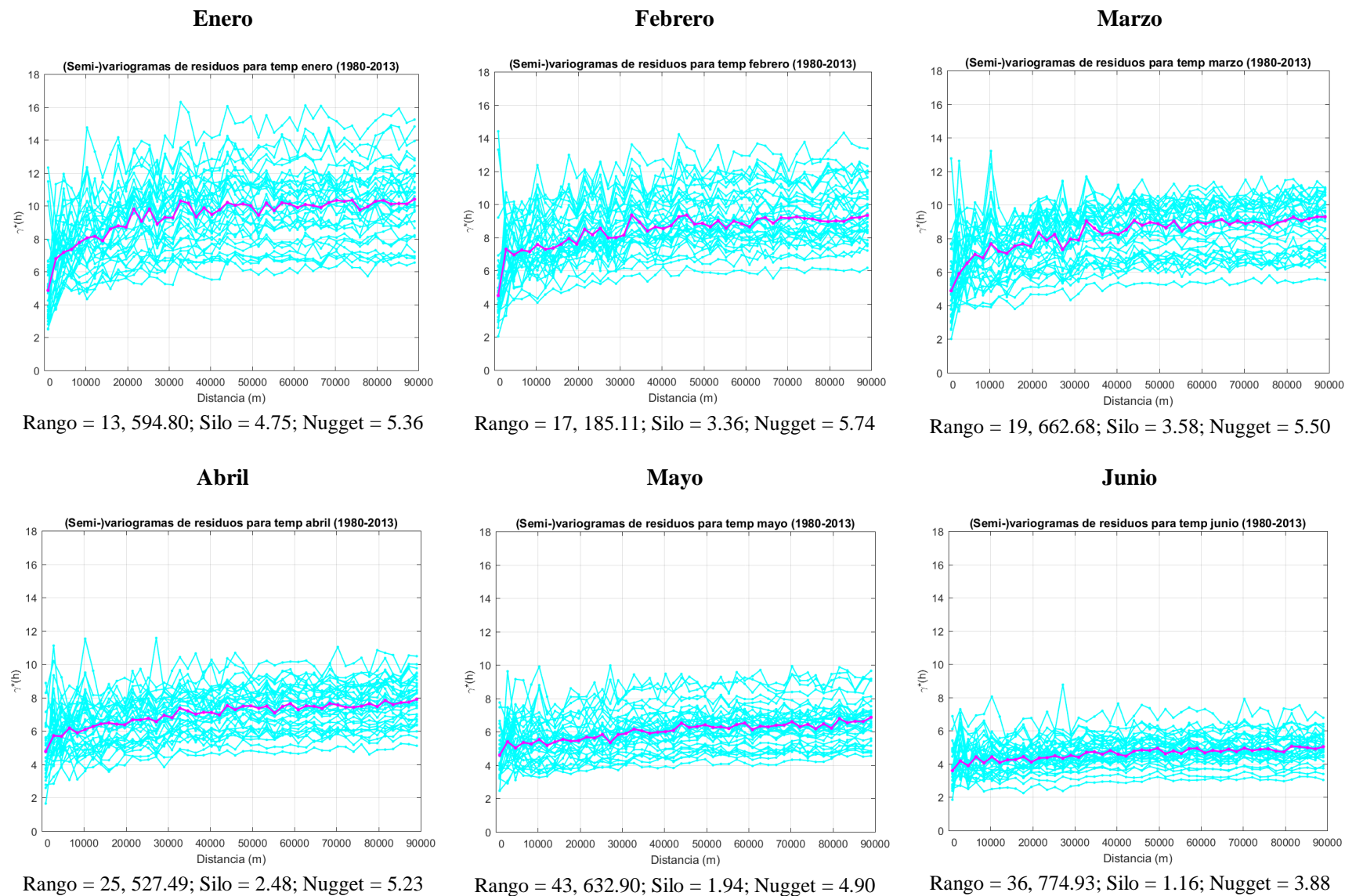
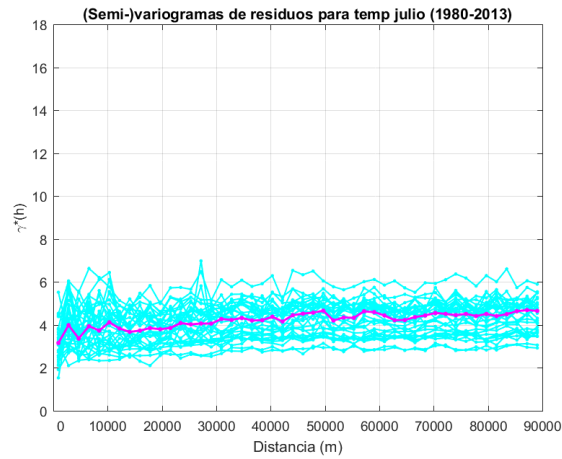
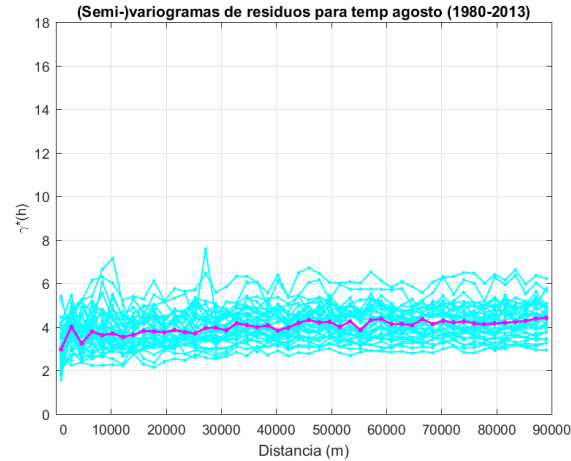


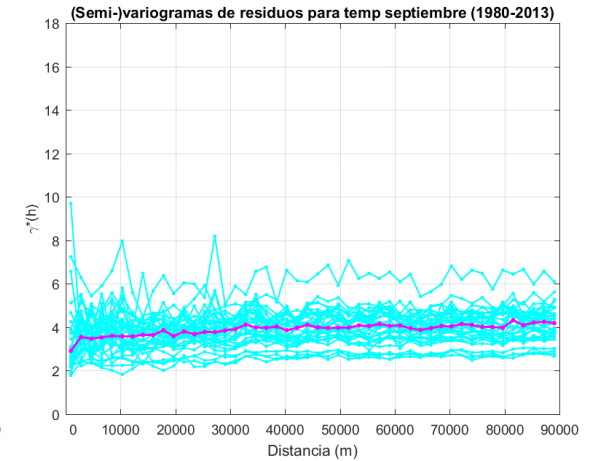
Figura 5.24 Variogramas regionales empleados para la interpolación de temperatura ambiente de enero a junio de 1980 con rango en m.

Julio

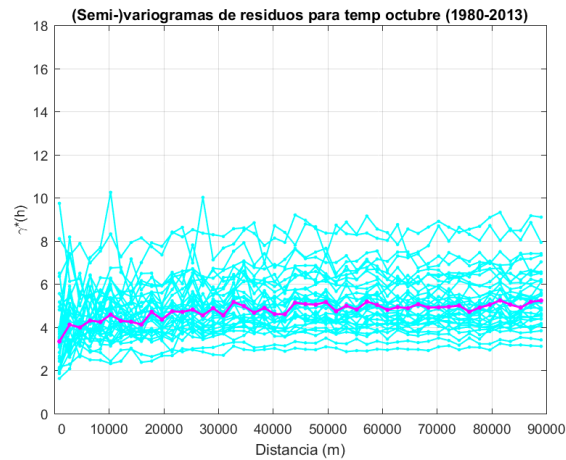
Rango = 34, 045.15; Silo = 1.18; Nugget = 3.46

Agosto

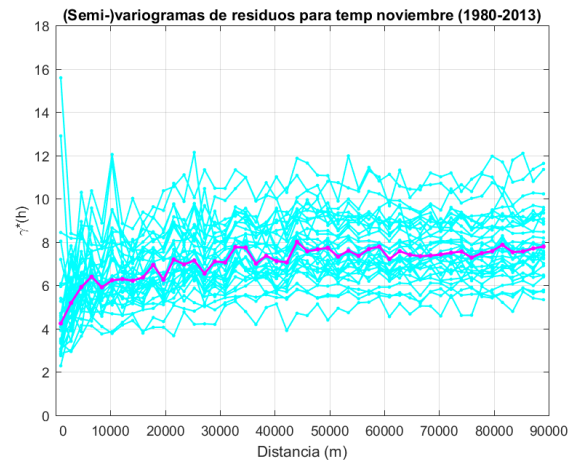
Rango = 32, 996.84; Silo = 0.97; Nugget = 3.37

Septiembre

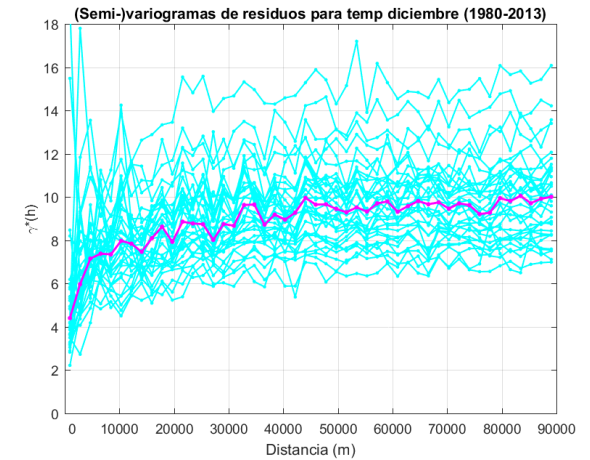
Rango = 22, 284.92; Silo = 0.90; Nugget = 3.22

Octubre

Rango = 16, 926.25; Silo = 1.36; Nugget = 3.65

Noviembre

Rango = 14, 173.28; Silo = 2.93; Nugget = 4.63

Diciembre

Rango = 14, 965.53; Silo = 4.48; Nugget = 5.20

Figura 5.25 Variogramas regionales empleados para la interpolación de temperatura ambiente de julio a diciembre de 1980 con rango en m.

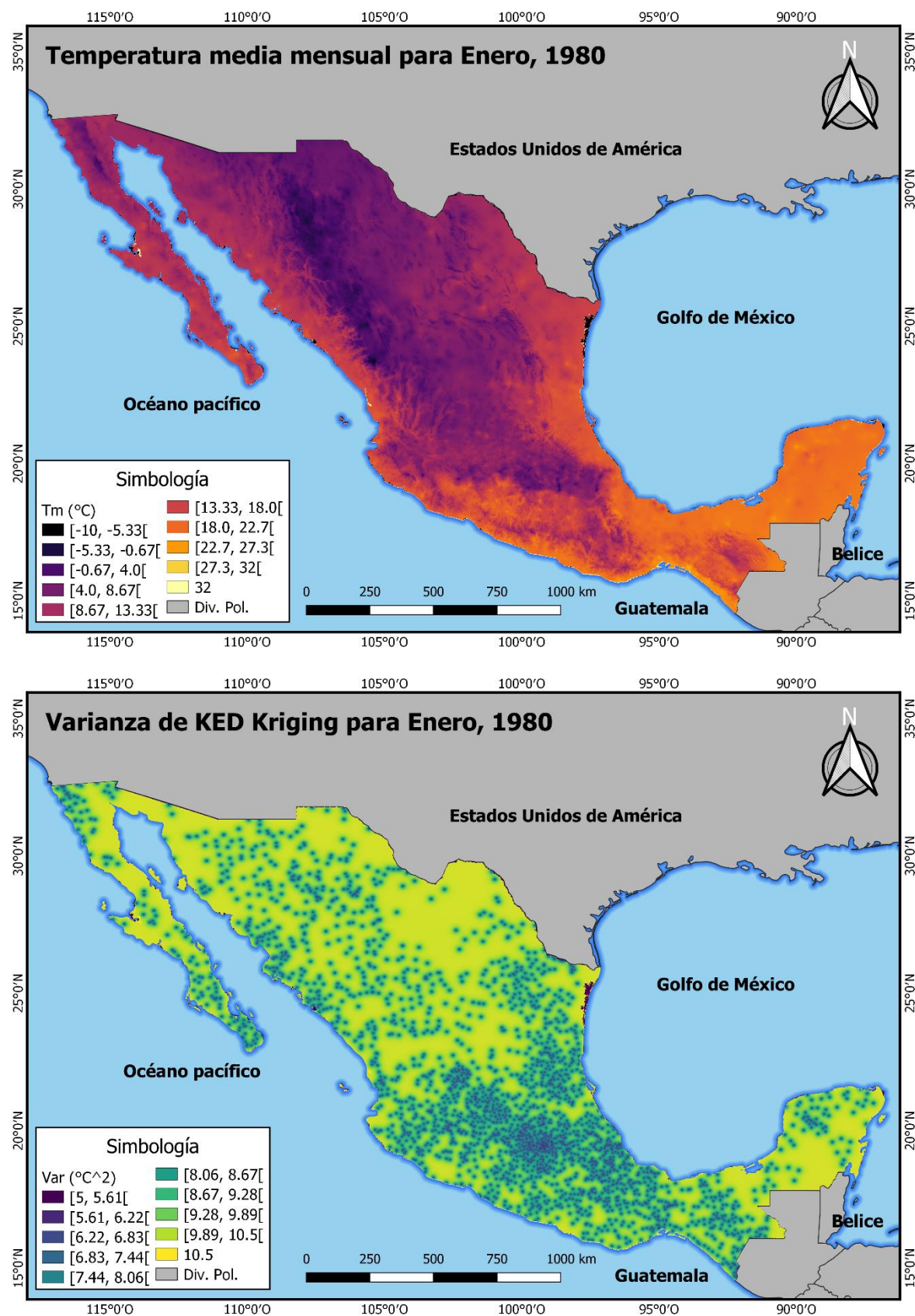


Figura 5.26 Temperatura estimada para el mes de Enero de 1980 y su varianza.

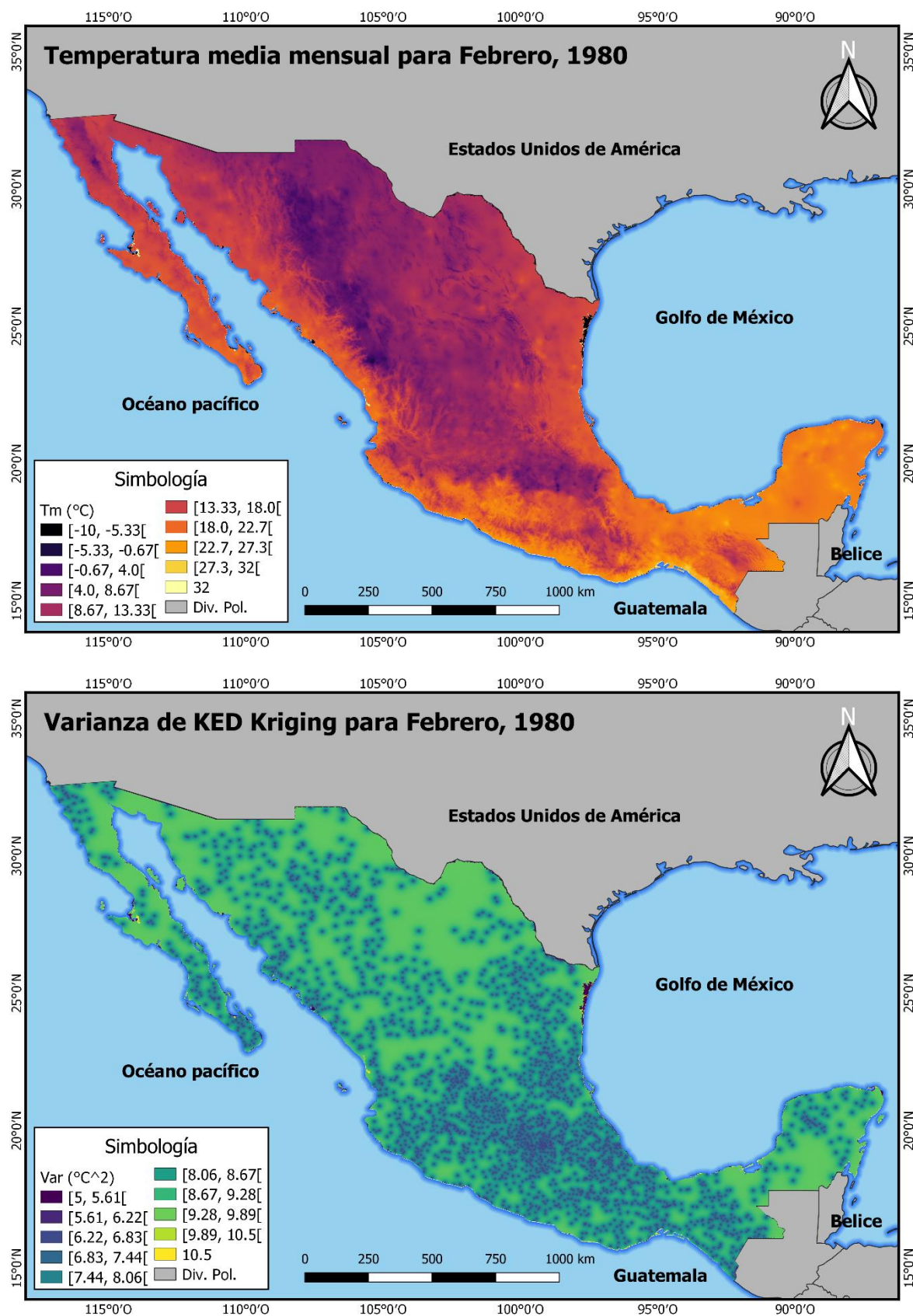


Figura 5.27 Temperatura estimada para el mes de Febrero de 1980 y su varianza.

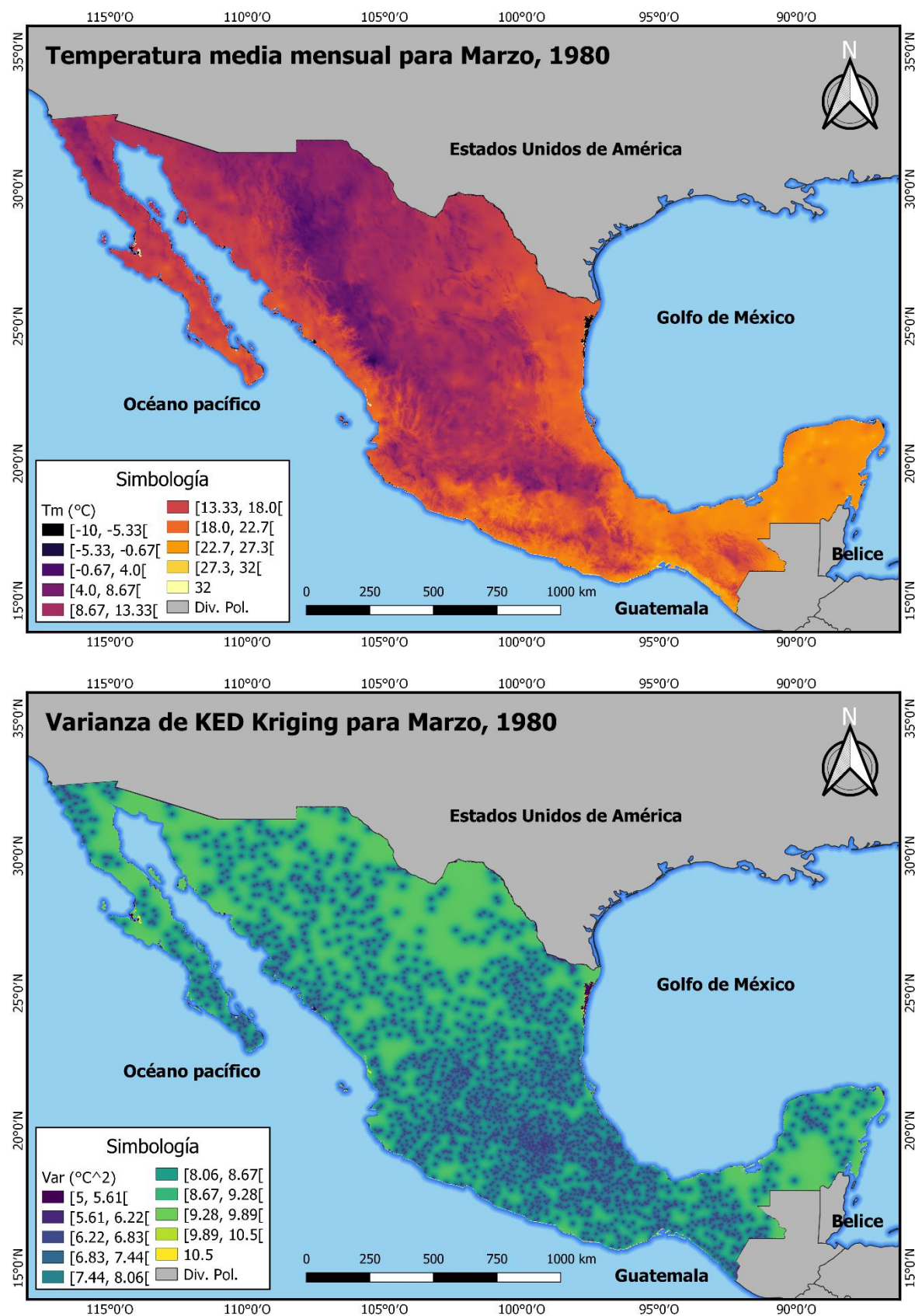


Figura 5.28 Temperatura estimada para el mes de Marzo de 1980 y su varianza.

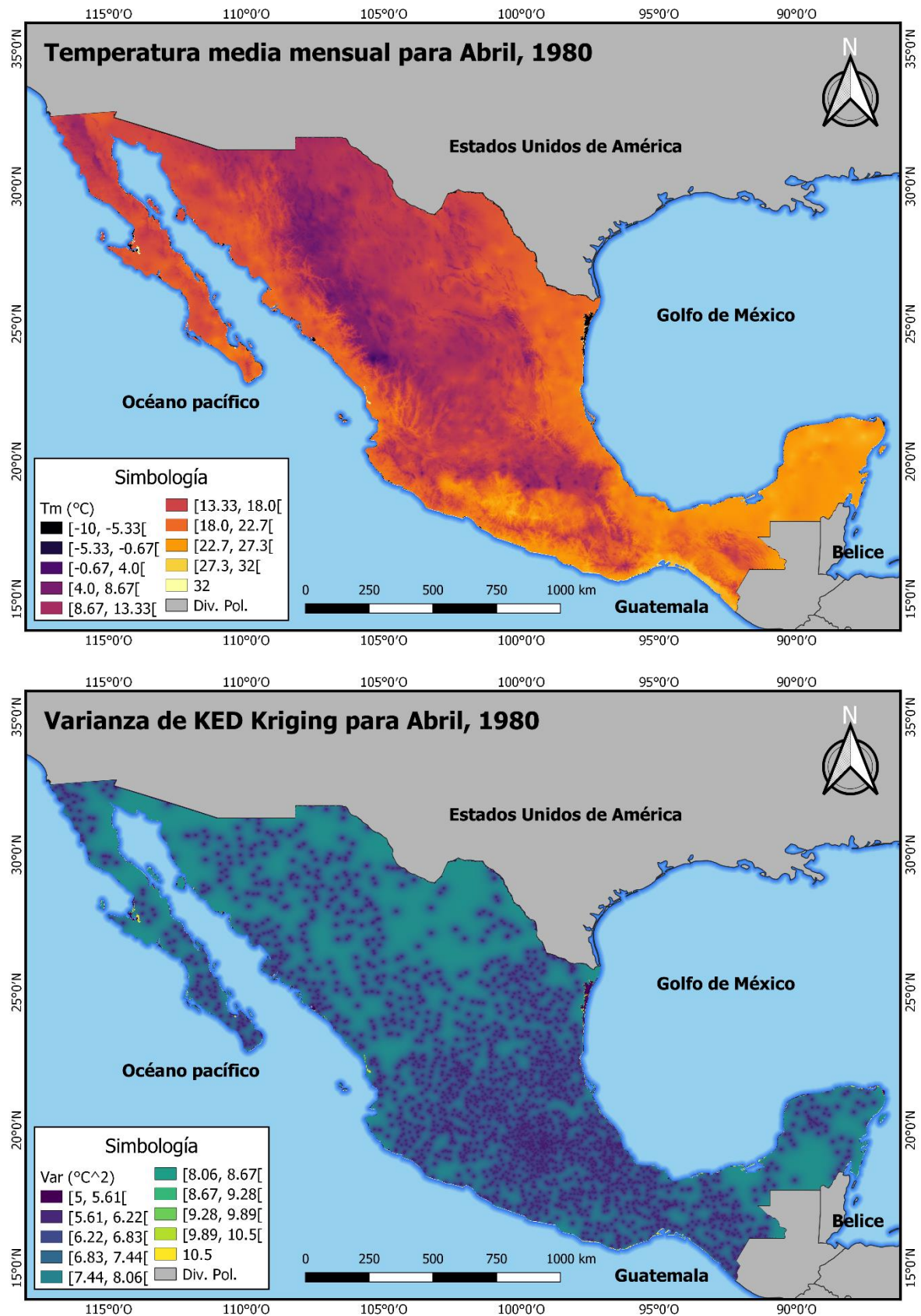


Figura 5.29 Temperatura estimada para el mes de Abril de 1980 y su varianza.

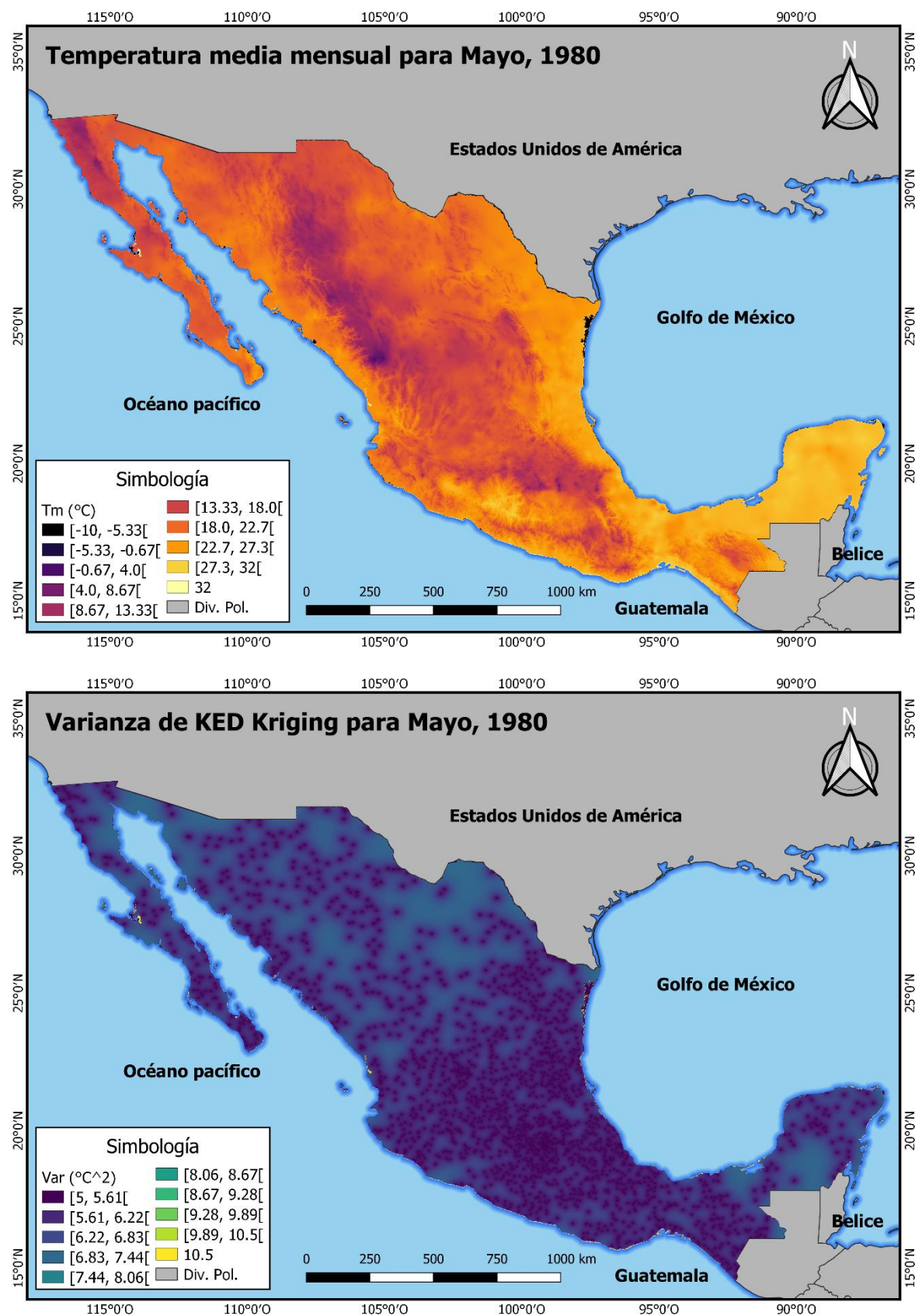


Figura 5.30 Temperatura estimada para el mes de Mayo de 1980 y su varianza.

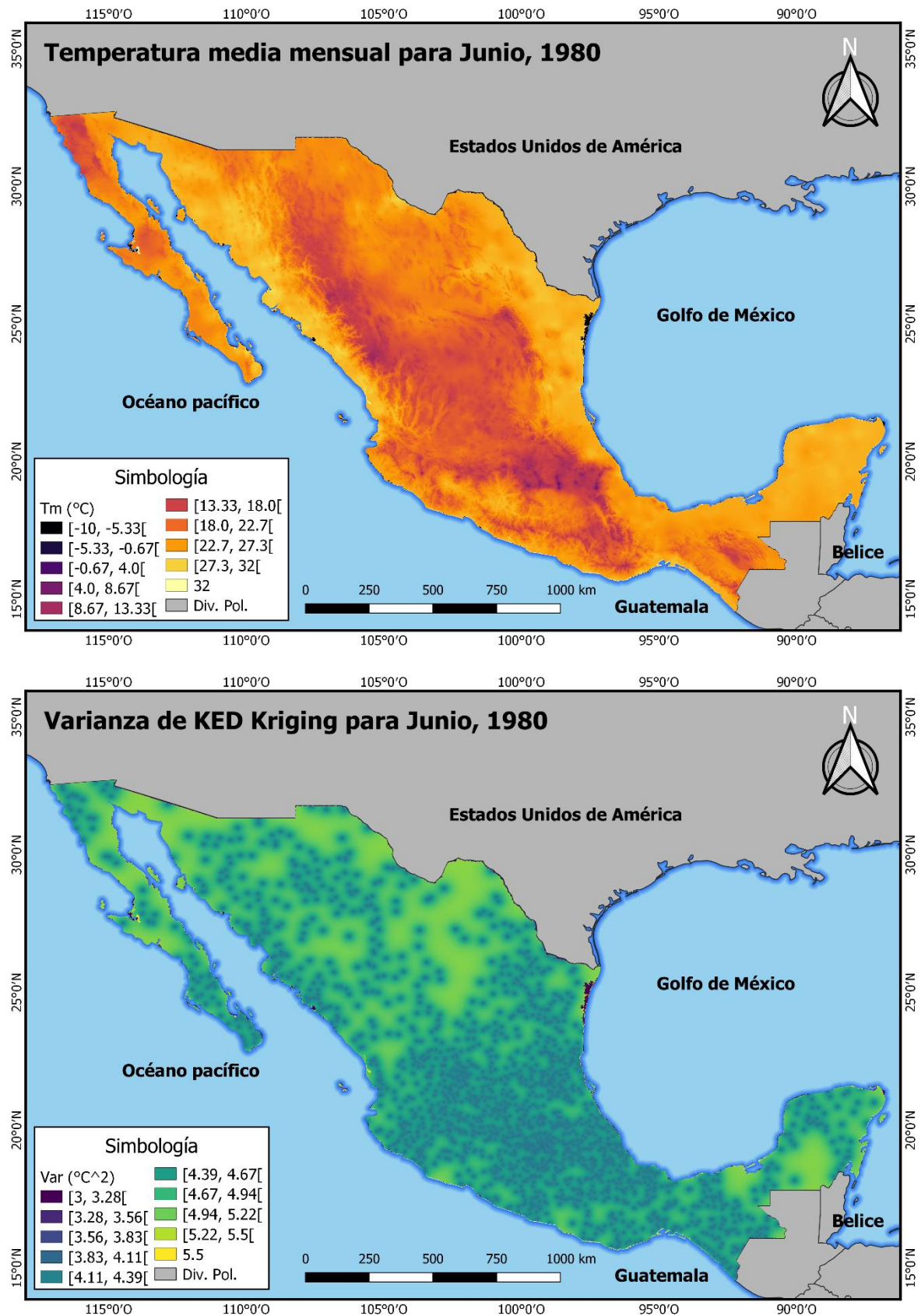


Figura 5.31 Temperatura estimada para el mes de Junio de 1980 y su varianza.

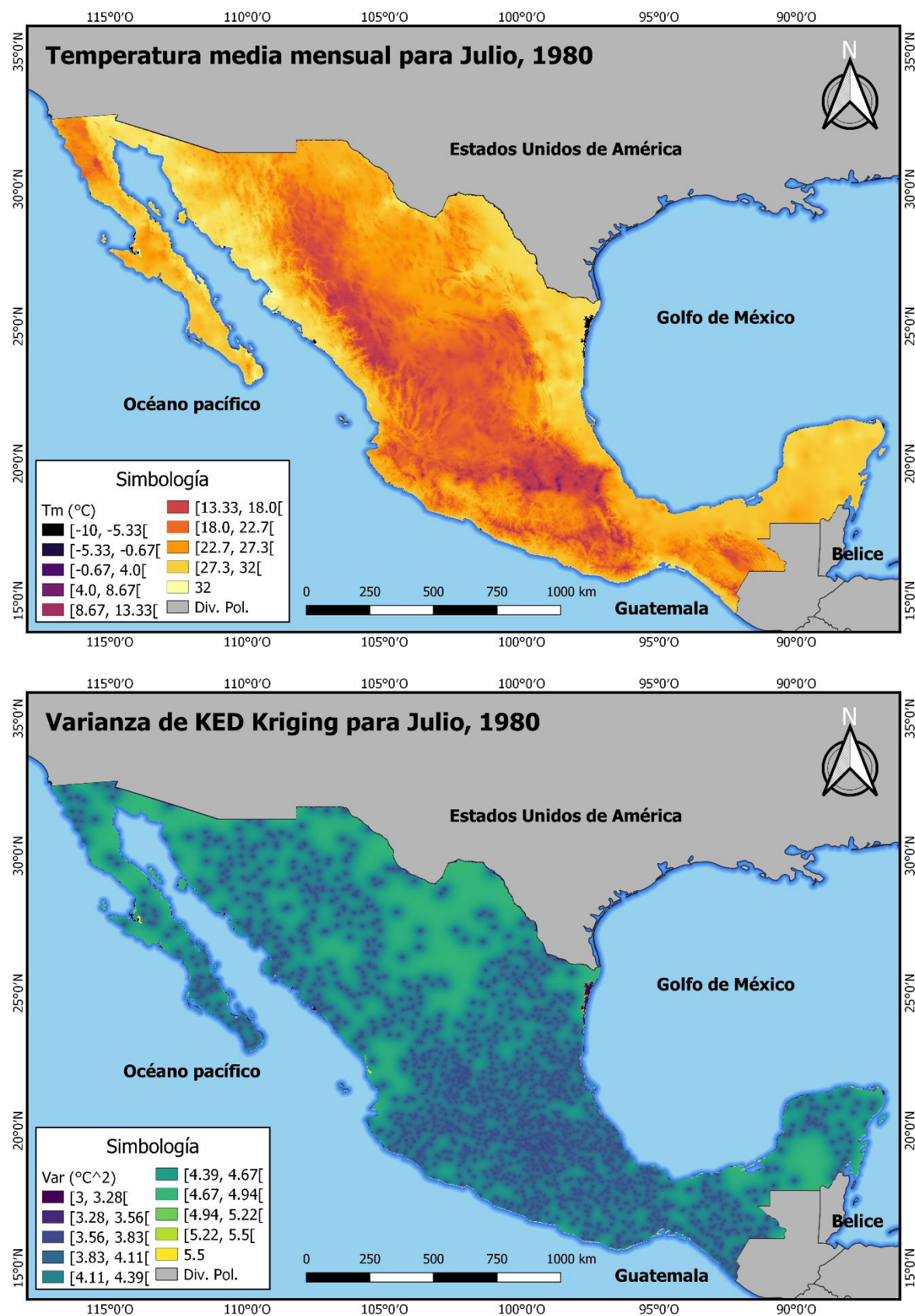


Figura 5.32 Temperatura estimada para el mes de Julio de 1980 y su varianza.

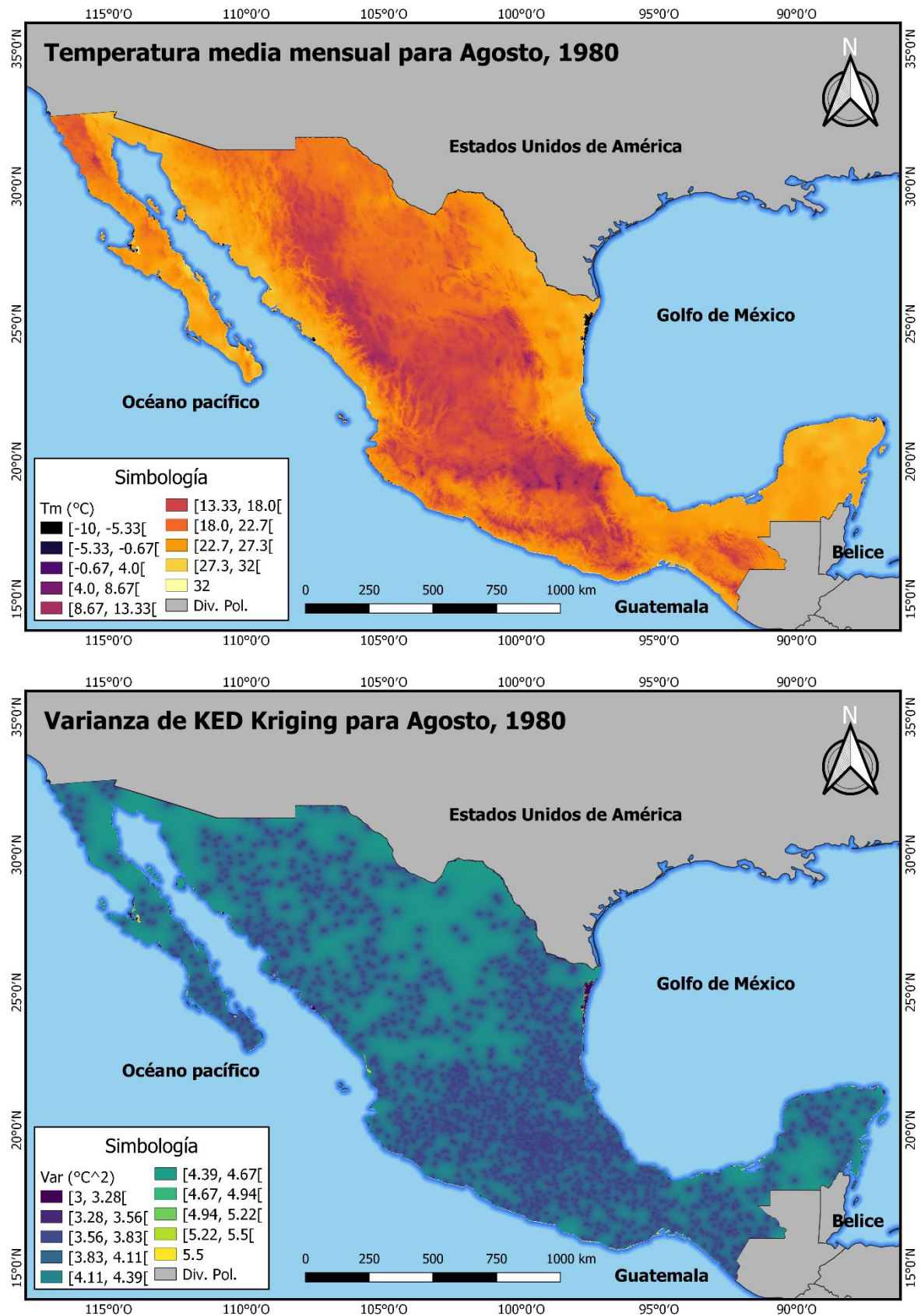


Figura 5.33 Temperatura estimada para el mes de Agosto de 1980 y su varianza

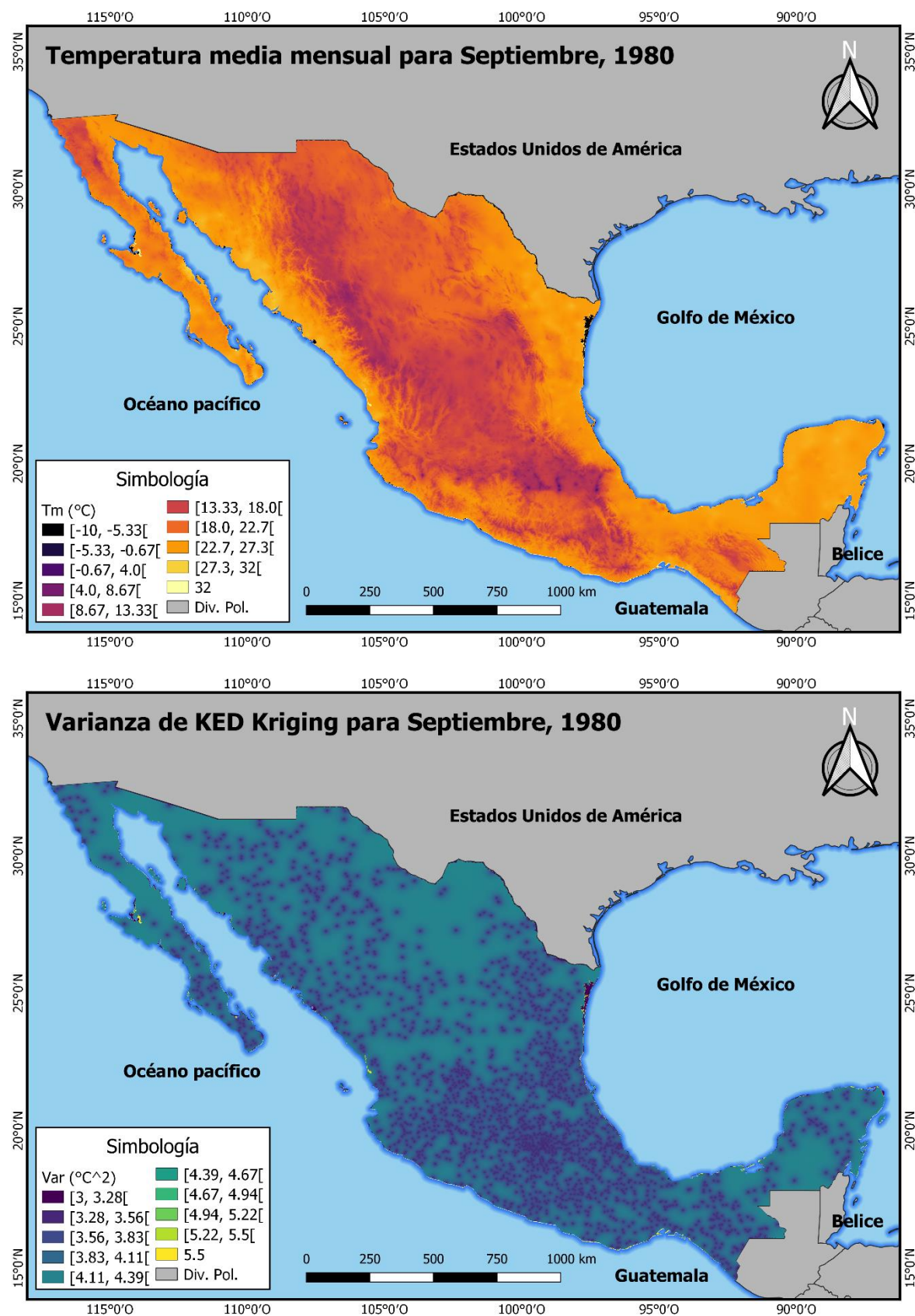


Figura 5.34 Temperatura estimada para el mes de Septiembre de 1980 y su varianza.

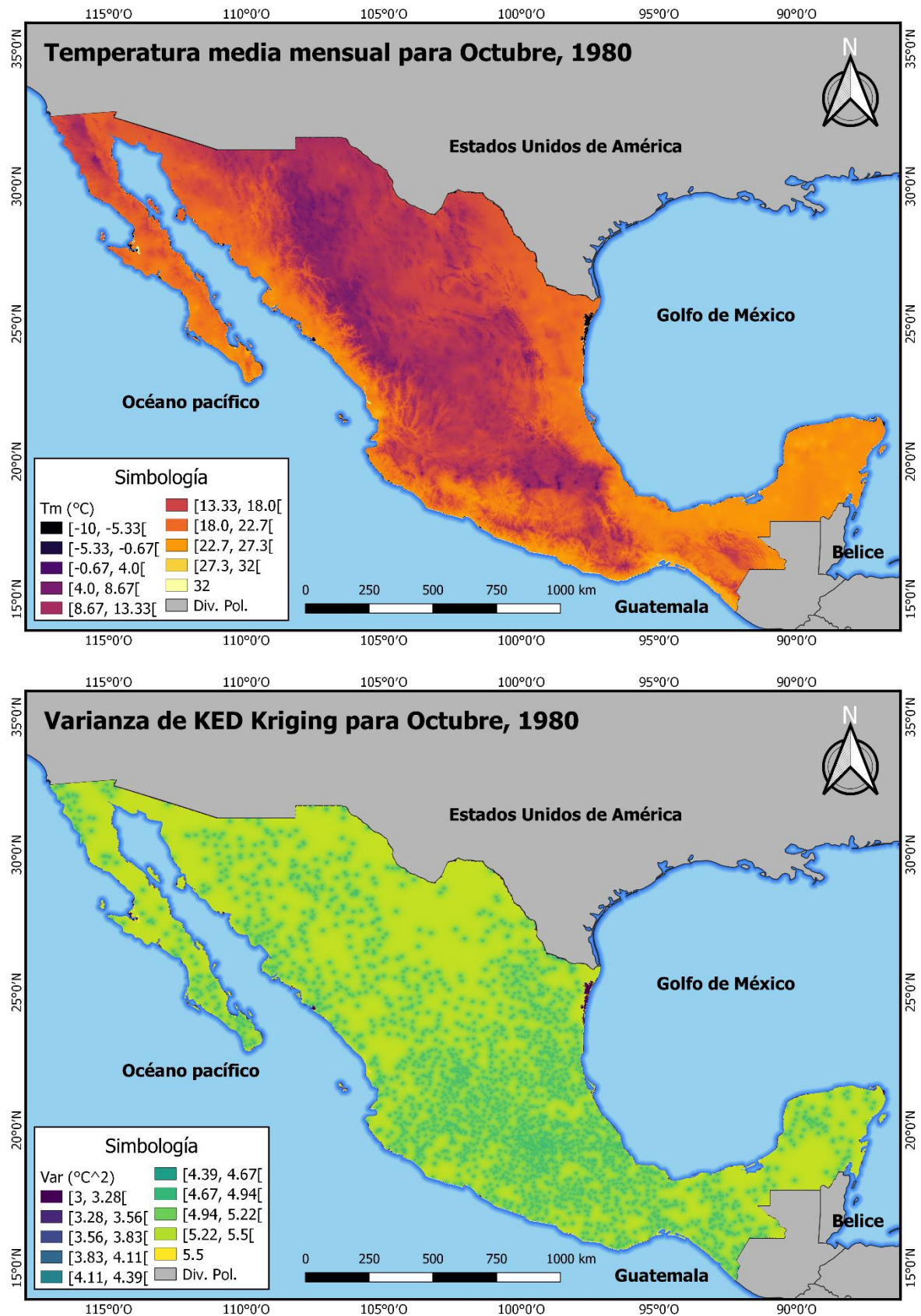


Figura 5.35 Temperatura estimada para el mes de Octubre de 1980 y su varianza

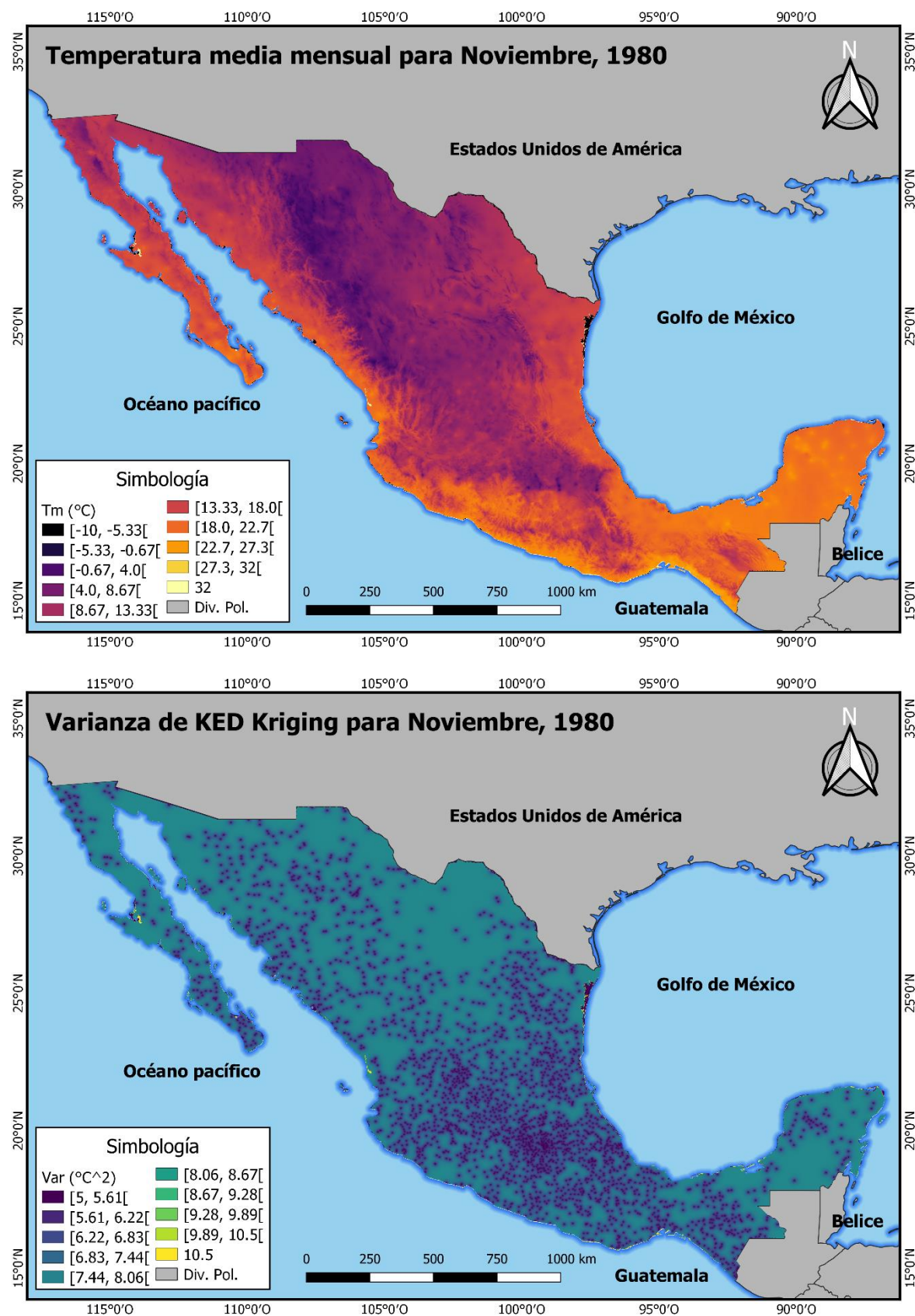


Figura 5.36 Temperatura estimada para el mes de Noviembre de 1980 y su varianza.

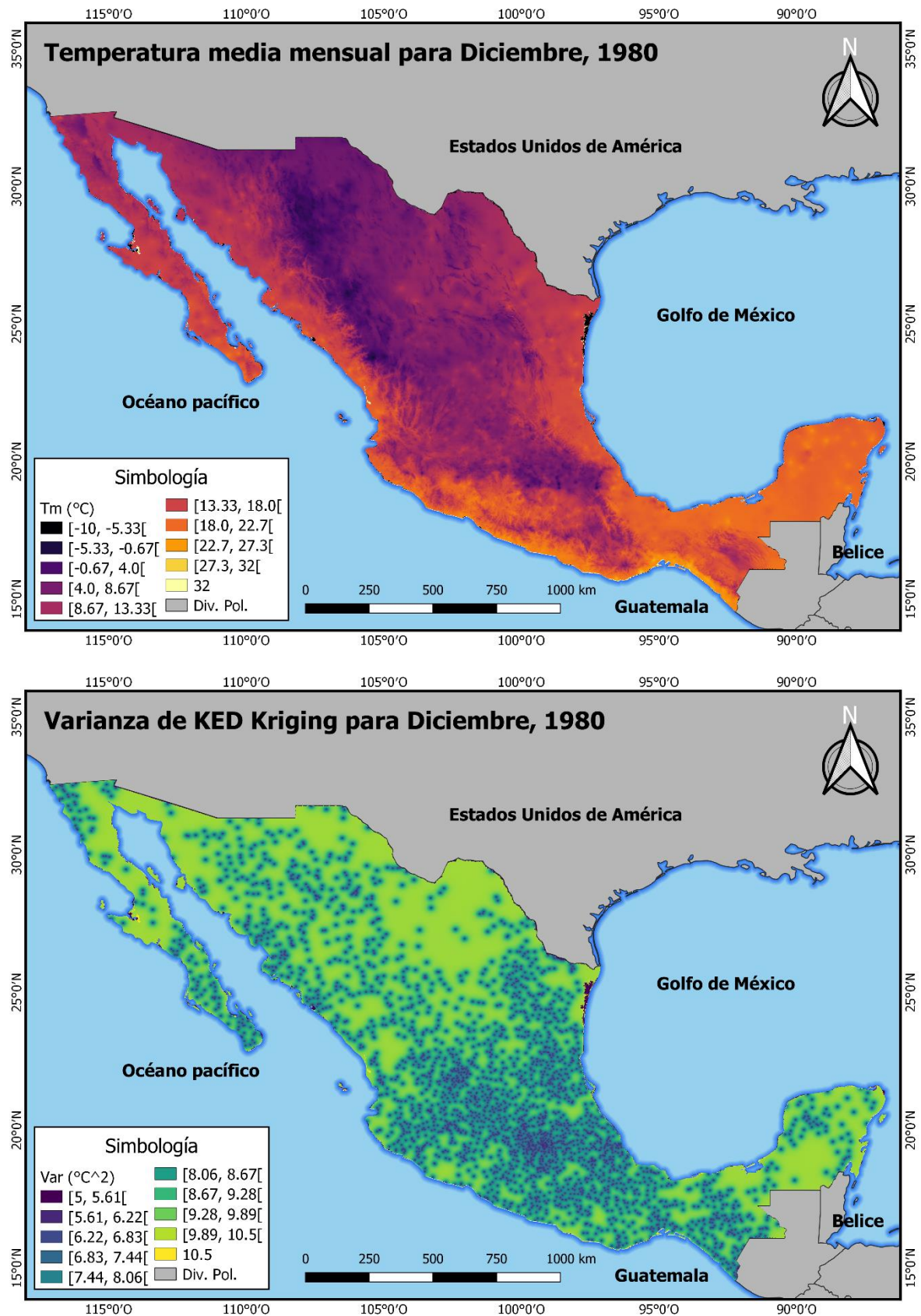


Figura 5.37 Temperatura estimada para el mes de Diciembre de 1980 y su varianza.

Tabla 5.7 Valores medios de los errores de interpolación para T (°C), T_{mín} (°C) y T_{máx} (°C).

Año	Variable								
	Temperatura ambiente			Temperatura mínima			Temperatura máxima		
	No. Est.	RMAE	NASH	No. Est.	RMAE	NASH	No. Est.	RMAE	NASH
1980	2419	0.13	0.92	2326	0.10	0.89	2371	0.13	0.92
1981	2366	0.02	0.91	2271	0.18	0.87	2315	0.11	0.95
1982	2402	0.22	0.87	2419	0.17	0.92	2417	0.18	0.92
1983	2381	0.04	0.91	2421	0.14	0.96	2384	0.07	0.89
1984	2378	0.12	0.93	2265	0.17	0.86	2269	0.14	0.84
1985	2265	0.14	0.95	2251	0.07	0.91	2264	0.13	0.92
1986	2331	0.15	0.98	2426	0.03	0.87	2394	0.05	0.94
1987	2401	0.14	0.82	2320	0.21	0.87	2392	0.20	0.90
1988	2411	0.05	0.90	2411	0.20	0.92	2411	0.05	0.87
1989	2406	0.08	0.93	2286	0.24	0.95	2300	0.08	0.86
1990	2286	0.18	0.91	2352	0.12	0.84	2327	0.13	0.89
1991	2410	0.20	0.95	2420	0.18	0.88	2410	0.18	0.90
1992	2307	0.03	0.89	2316	0.21	0.88	2309	0.13	0.87
1993	2354	0.23	0.89	2375	0.05	0.89	2370	0.11	0.84
1994	2429	0.24	0.88	2369	0.11	0.92	2395	0.16	0.87
1995	2288	0.04	0.91	2347	0.19	0.93	2333	0.06	0.92
1996	2413	0.14	0.92	2270	0.15	0.95	2413	0.15	0.95
1997	2367	0.22	0.92	2289	0.11	0.92	2306	0.13	0.92
1998	2278	0.10	0.91	2273	0.09	0.87	2276	0.09	0.89
1999	2257	0.12	0.95	2367	0.01	0.83	2327	0.02	0.84
2000	2269	0.12	0.97	2329	0.01	0.84	2290	0.10	0.92
2001	2367	0.02	0.98	2433	0.22	0.92	2411	0.19	0.94
2002	2255	0.23	0.91	2270	0.05	0.86	2257	0.20	0.90
2003	2314	0.22	0.88	2377	0.07	0.87	2326	0.17	0.87
2004	2301	0.02	0.87	2304	0.12	0.86	2304	0.03	0.86
2005	2347	0.03	0.89	2302	0.16	0.89	2325	0.06	0.89
2006	2368	0.08	0.86	2272	0.07	0.91	2299	0.08	0.90
2007	2251	0.16	0.85	2355	0.10	0.92	2342	0.12	0.87
2008	2408	0.22	0.86	2419	0.15	0.84	2411	0.20	0.84
2009	2347	0.15	0.88	2367	0.24	0.85	2362	0.17	0.87

5.3.4. Interpolación de precipitación.

La precipitación se interpoló por medio de la herramienta informática SAMPO TBM (Figura 5.38). Se emplearon 120 bandas turnantes para crear 36 simulaciones independientes por mes. La simulación final de precipitación mensual se construye con la esperanza matemática de las simulaciones independientes (la media). Se empleó una distribución de probabilidad gaussiana inversa para la anamorfosis. El variograma espaciotemporal para describir la estructura del indicador de precipitación nula y del campo de precipitación no nula es de forma exponencial. La Tabla 5.8 muestra los parámetros de los variogramas para cada mes del año 1980. De la Figura 5.39 a la Figura 5.44 se muestran las simulaciones campos advectivos homogéneos de precipitación intermitente para cada mes del año 1980.

The screenshot shows the SAMPO software interface with the following sections and values:

- Cas d'étude:** Famille: ..\bloc_1, Cas: <choisir un cas>, Descriptif: Sous-répertoire du run: DemoRun, (titre de l'étude):
- Propriétés des champs:**
 - Distribution ponctuelle de la pluie non nulle (mm/h):** Distribution: gaussienne centrée réduite, Moyenne: 0, Ecart-type: 1, Param3: Param4, (nom du fichier des prn empiriques):
 - Distribution de l'intermittence:** % de zéros: 0
- Structure spatiale et temporelle de la pluie non nulle:**
 - Modèle: Sphérique, Paramètre (m): 5000, Palier (% total): 100.0
 - Modèle: Aucun, Paramètre (m): 100000, Palier (% total): 0.0, Eul
 - Durée Lagr. équiv. à première portée (s): 200000, 4998.438
 - Anisotropie: theta: 0.0, facteur: 1.0
- Structure spatiale de la gaussienne sous-jacente à l'intermittence:**
 - Modèle: Sphérique, Paramètre (m): 200000, Palier (% total): 100.0
 - Modèle: Aucun, Paramètre (m): 200000, Palier (% total): 0.0
 - Durée Lag. équiv. à première portée (s): 36000
 - Anisotropie: theta: 0.0, facteur: 1.0
- Propagation des pluie non-nulles:** Célérité (m/s): 1, Provenance (0=H: 240, ...): 40
- Propagation de l'intermittence:** Célérité (m/s): 1, Provenance (*): 240
- Caractéristiques de la simulation:**
 - Géométrie de simulation:**
 - Mailage: nX = 20, dX (m) = 500.0, nY = 15, dY (m) = 500.0, nT = 60, dt (s) = 86400, Centre en x: 794129, en y: 2086584
 - Grille régulière: ☒ Stations localisées: Loire39.txt, Créer grille
 - Paramètres effectifs à la grille (mm):** EditmPnn, EditSPnn, EditpourCentInt, mPnn, sPnn, % de zéros
 - Affichage:** ☒ Affiche en cours de calcul, ☒ Vecteur cosmétique, ☒ Axes, ☒ Intermittence, Loire
 - Exportations:** ☐ Structure, ☒ Champs simulés, Cumuls selon grille
 - Non documenté:** ras, ☐ plus rotation, 0, Sous type simulé, ☐ time dependent advection
- Calcul...:** ☐ Pts radar? point_significatifs.txt, 1, 99999, read data and tune parameters for all, ☐ Tune parameters on data, from... to ... how much ..., from 1 to 9999 how many 1024
- Etat:** Démarrage...

Figura 5.38 Interfaz de la herramienta informática geoestadística SAMPO.

Tabla 5.8 Parámetros de variogramas ajustados para el indicador de precipitación nula y para el campo de precipitación no nula.

Mes	Precipitación nula			Precipitación no nula		
	Rango (m)	Silo (mm)	Nugget (mm)	Rango (m)	Silo (mm)	Nugget (mm)
Enero	59915.91	100.00	0.00	99234.39	100.00	0.00
Febrero	60059.81	100.00	0.00	119865.01	100.00	0.00
Marzo	59004.42	100.00	0.00	140739.03	100.00	0.00
Abril	59040.58	100.00	0.00	93747.29	100.00	0.00
Mayo	59227.11	100.00	0.00	86200.66	100.00	0.00
Junio	59509.93	100.00	0.00	93714.13	100.00	0.00
Julio	59107.07	100.00	0.00	100132.43	100.00	0.00
Agosto	60039.00	100.00	0.00	99856.08	100.00	0.00
Septiembre	59689.89	100.00	0.00	98383.55	100.00	0.00
Octubre	58799.19	100.00	0.00	99534.56	100.00	0.00
Noviembre	59066.14	100.00	0.00	94881.81	100.00	0.00
Diciembre	59109.02	100.00	0.00	118890.59	100.00	0.00

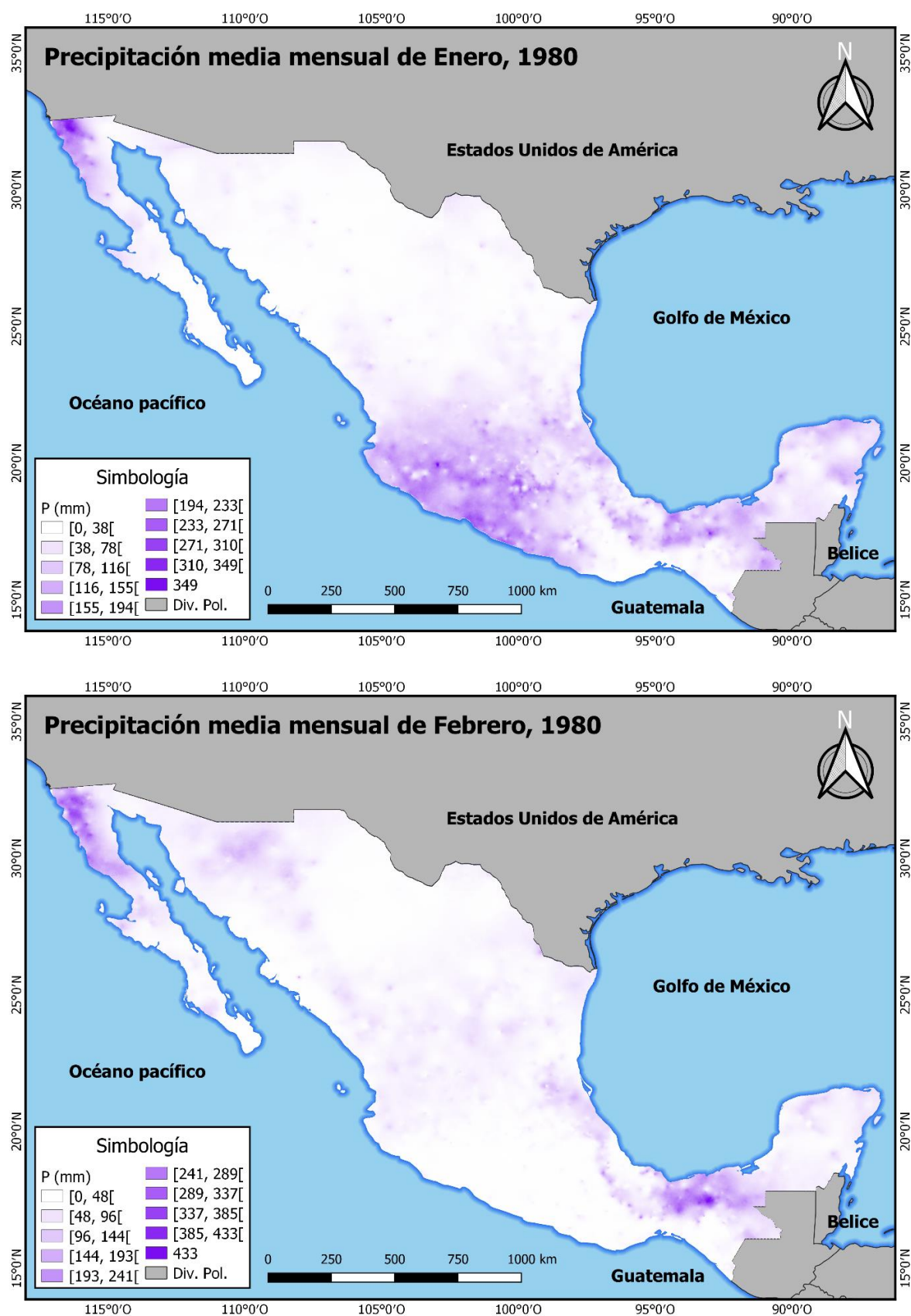


Figura 5.39 Mapas de precipitación media mensual para enero y febrero de 1980.

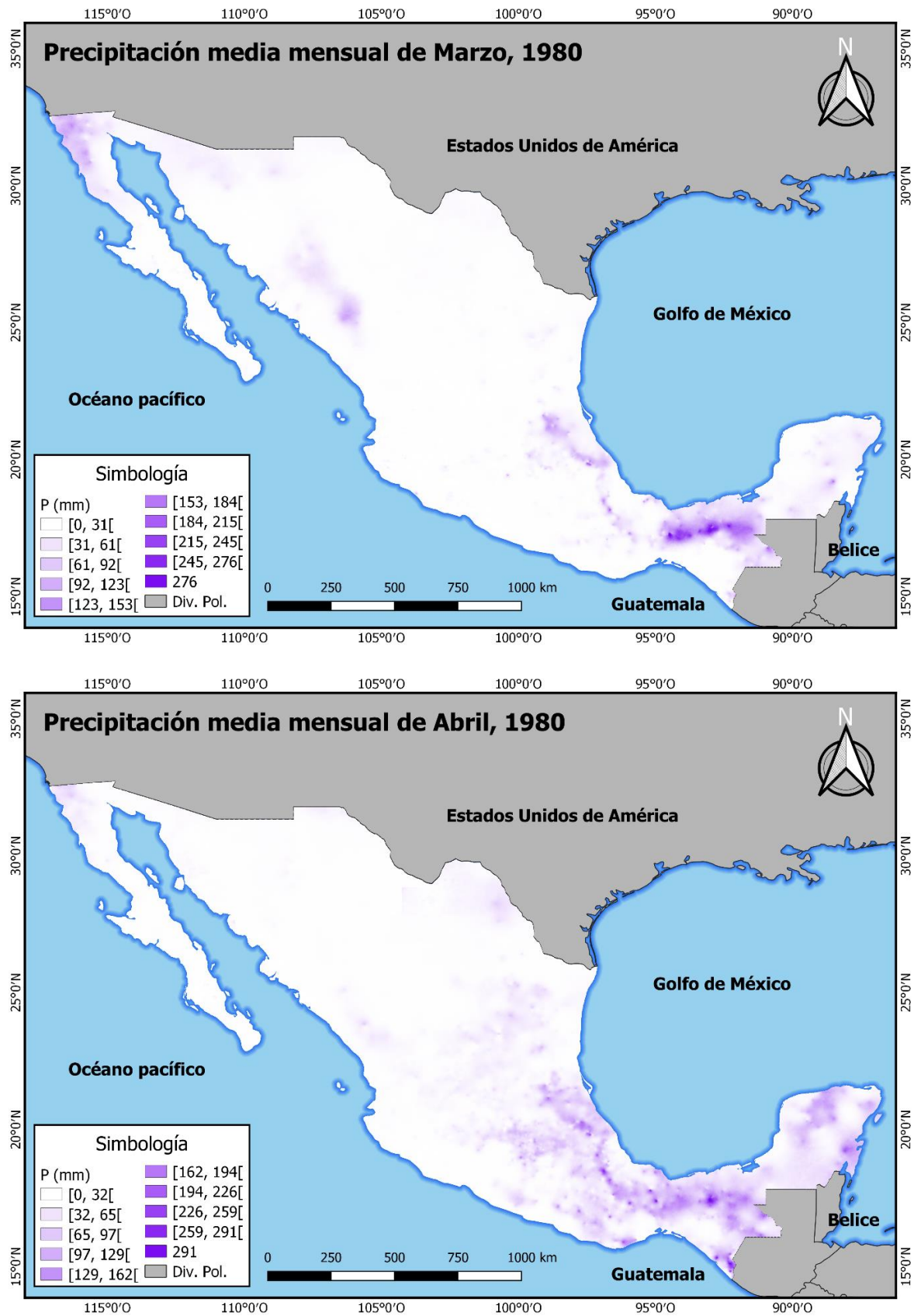


Figura 5.40 Mapas de precipitación media mensual para marzo y abril de 1980.

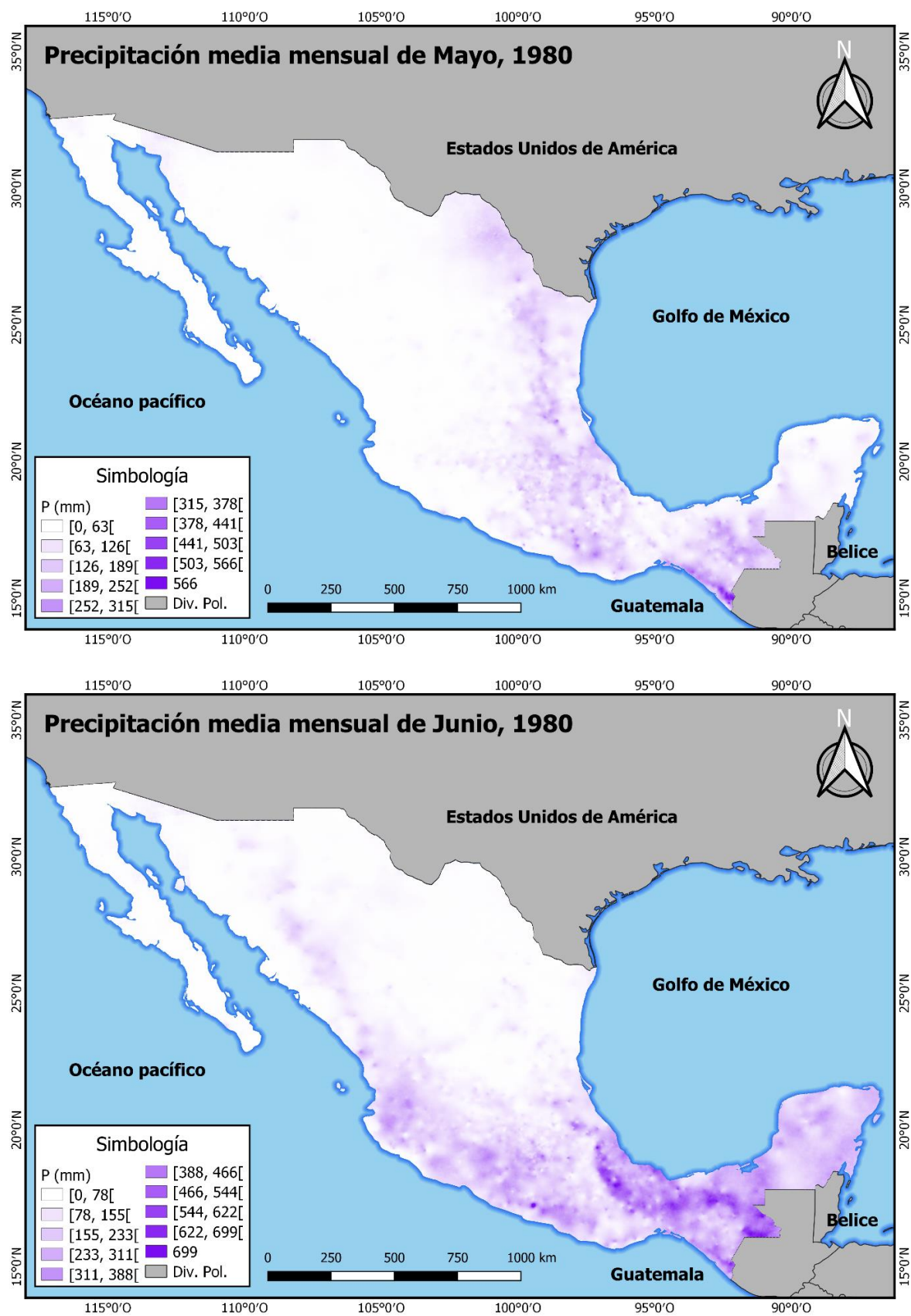


Figura 5.41 Mapas de precipitación media mensual para mayo y junio de 1980.

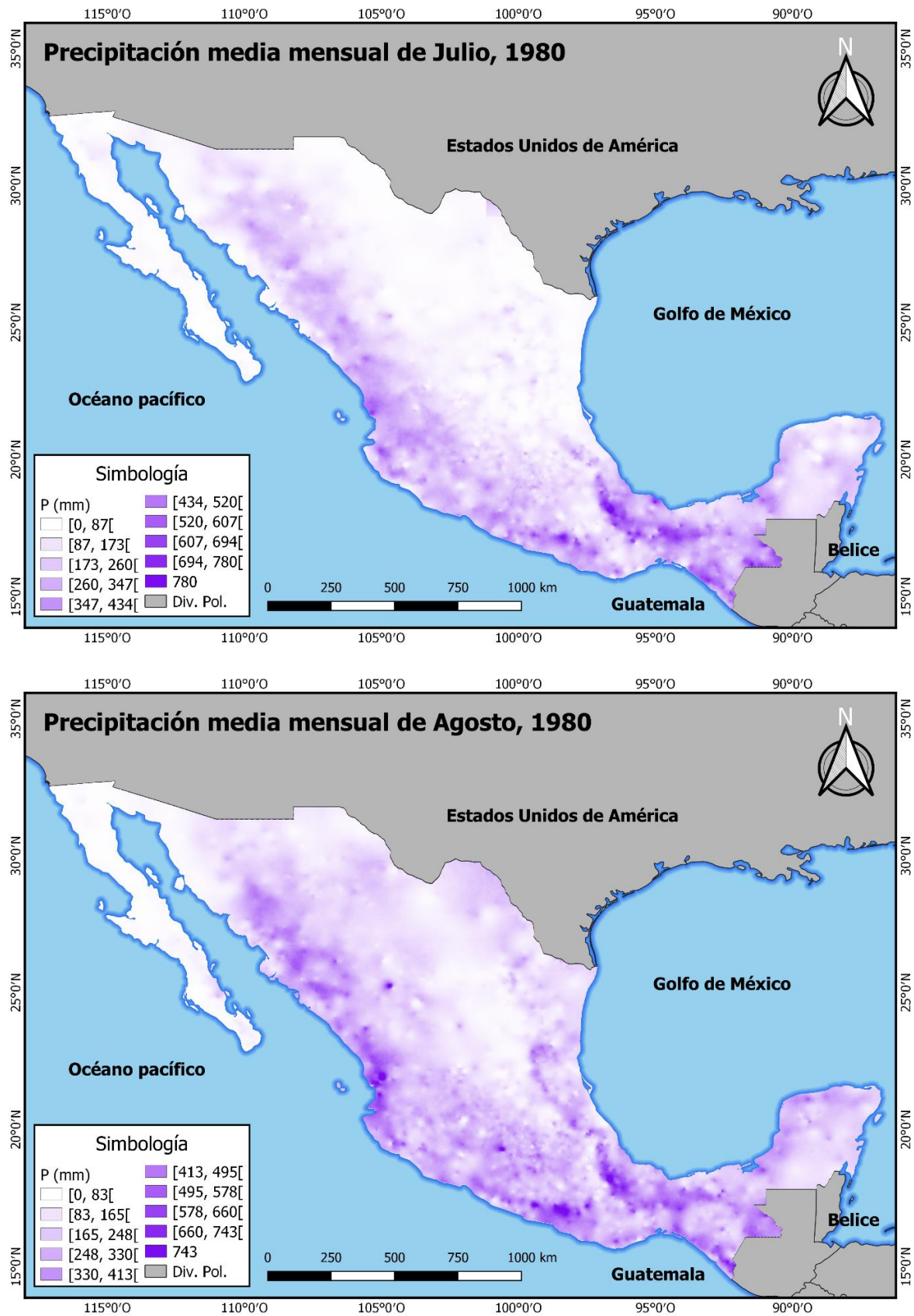


Figura 5.42 Mapas de precipitación media mensual para julio y agosto de 1980.

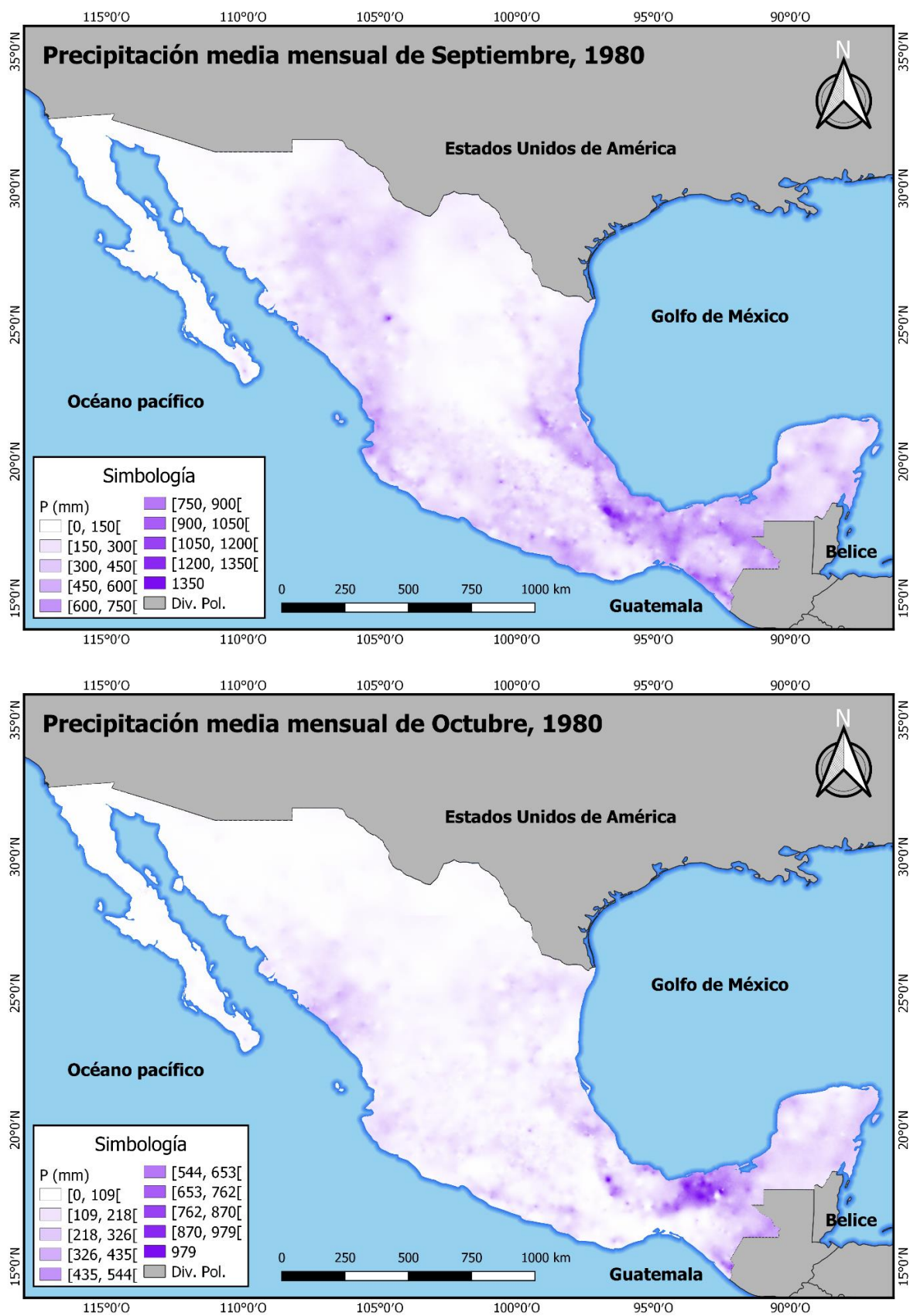


Figura 5.43 Mapas de precipitación media mensual para septiembre y octubre de 1980.

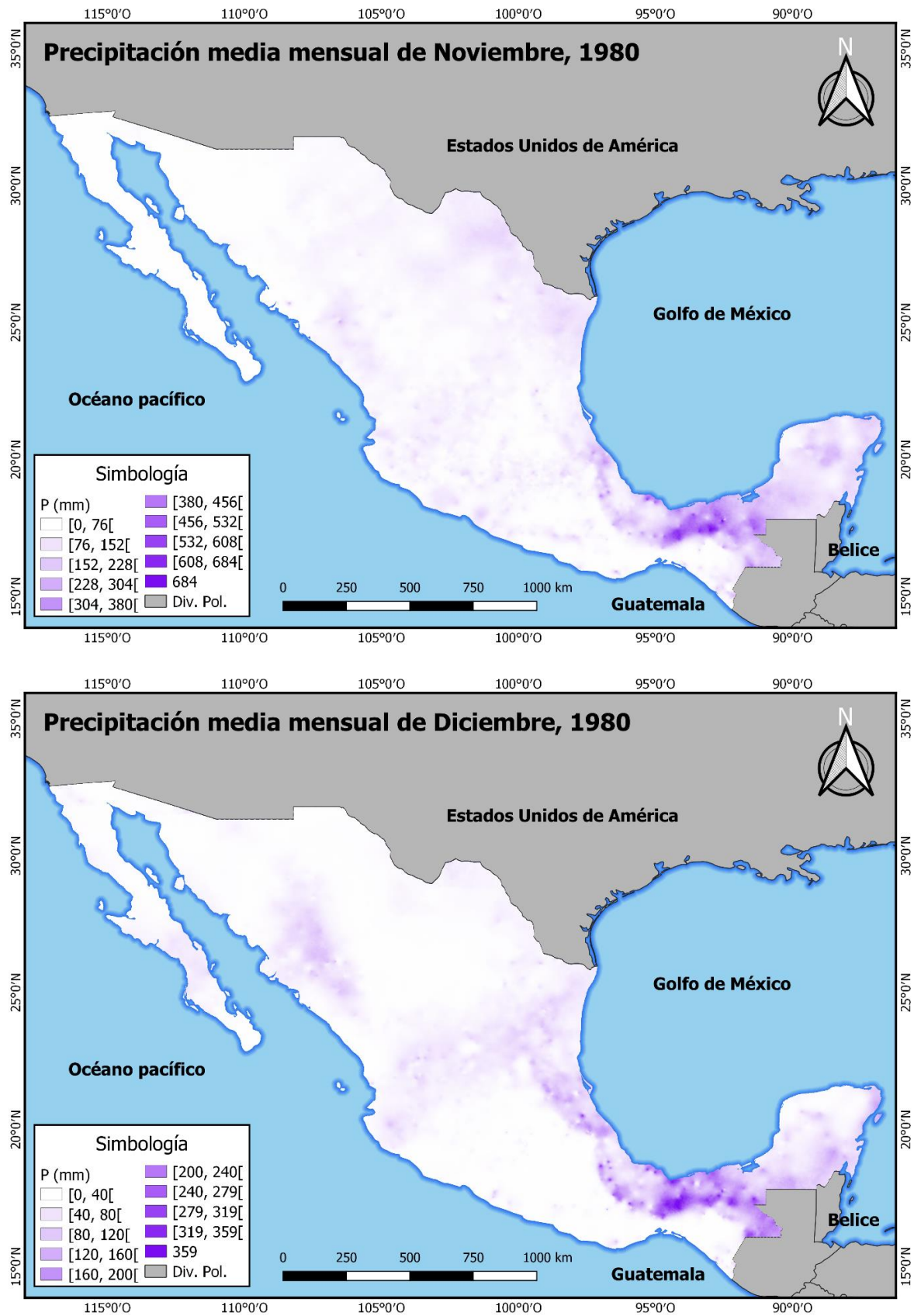


Figura 5.44 Mapas de precipitación media mensual para noviembre y diciembre de 1980.

5.4. Conclusiones y recomendaciones

El clima es un fenómeno diverso y complejo en todo el mundo, cuya representación espacial representa un reto para la comunidad científica debido a las variaciones geográficas globales y locales (latitud, altitud, localización de costas cercanas, etc.). Este reto es aún mayor cuando no se cuenta con una cantidad suficiente de estaciones de monitoreo que proporcionen la información necesaria para desarrollar y/o aplicar métodos de espacialización climática. Por otro lado, la calidad de los datos observados juega un papel decisivo en la incertidumbre de la estimación de cualquier superficie climática.

En México, el reto de espacializar la magnitud de variables climáticas se ve magnificado por tres razones importantes. La primera de ellas se debe a la localización geográfica del país, ya que sus playas son bañadas por aguas del océano Pacífico por el oeste y del océano Atlántico por el este. Esta particular ubicación influye en la humedad proveniente de ambos océanos. Así mismo, se cuenta con tres cadenas montañosas que limitan el paso de la humedad oceánica hacia el altiplano. Lo anterior da génesis a climas lluviosos y áreas densas de vegetación en el lado de barlovento (Figura 5.39 a Figura 5.44). A medida que el aire húmedo asciende por las sierras se enfría y se seca. Al descender por el lado de sotavento vuelve a calentarse y adquiere humedad del ambiente, generando condiciones semi-áridas (Figura 5.41). De esta forma, la latitud, longitud y altitud juegan un papel importante en los regímenes térmicos y pluviales a escala regional en México.

Otra razón importante es que, en general, la información proveniente de las estaciones de monitoreo no cuenta con un periodo uniforme de registro en todo el territorio nacional (Figura 5.12 a Figura 5.15). Actualmente, sólo el 57.51% de la red de monitoreo climático de México se encuentra en condiciones de operación. Adicionalmente, la calidad de información de las estaciones climáticas convencionales mengua la información disponible de confianza para la espacialización de la magnitud de variables climáticas (Figura 5.16). Lo anterior, implica una mayor incertidumbre en la estimación para cualquier periodo con escasa cantidad de datos. De hecho, el norte de la república mexicana muestra una menor cantidad de estaciones de monitoreo y, por ende, una mayor incertidumbre en la estimación climática (mapas de varianza de Kriging; Figura 5.26 a Figura 5.37).

La tercer dificultad se presenta por la presencia de fenómenos naturales como huracanes y ENOS. Estos fenómenos crean condiciones extraordinarias en el clima global y regional de México. Sus efectos modifican la varianza de los regímenes pluvial y termal. Sin embargo, su ocurrencia no modifica la estructura de cualquier variograma regional en el país (Figura 5.24 y Figura 5.25).

El valor estimado de una variable climática, por cualquier método geoestadístico de interpolación, es una combinación lineal del producto de los pesos ponderados de cada estación de monitoreo por la magnitud observada (Ec. 5-26). Esto implica que cualquier método de Kriging guarda un enfoque lineal del problema. Sin embargo, la dinámica del clima en México,

tanto a escala regional como local, no puede ser parametrizada por un sólo variograma ya que existen factores geográficos causantes de las variaciones locales. En la presente investigación, la variabilidad geográfica fue considerada a través del método de Kriging con factor de cambio externo. De esta forma, fue posible espacializar la magnitud de las variables climáticas con un variograma regional donde la variación local quedó en función de la latitud, longitud y altitud. Cabe mencionar que estos factores geográficos han sido empleados por diversos autores para desarrollar superficies de variables climáticas en México (Cuervo-Robayo et al., 2013; Saenz-Romero et al., 2009; Téllez-Valdés et al., 2006).

Los variogramas regionales resumen la estructura espacial de las estaciones de monitoreo en México. Los mapas de varianza de Kriging reflejan que hay una mayor varianza en las magnitudes de las temperaturas a partir del mes de noviembre hasta el mes de mayo, lo cual es consistente con las gráficas de los variogramas regionales (Figura 5.24 y Figura 5.25).

Las superficies climáticas desarrolladas por Cuervo-Robayo et al. (2013), Romero et al. (2009) y Téllez-Valdés et al. (2006) ponen a disposición información de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. La presente investigación anexa una nueva variable climática: la temperatura ambiente. La Tabla 5.9 muestra una comparación de las estadísticas de error, número de estaciones empleadas y periodo considerado de las superficies desarrolladas por Cuervo-Robayo et al. (2013) y los obtenidos en la presente investigación.

Tabla 5.9 Número de estaciones, periodo y estadísticas de error de dos bases climáticas espacializadas para México.

Autor	Número de estaciones	Periodo	MAE
Cuervo-Robayo et al. (2013)	4966 Precipitación	1910 – 2009	3.17 - 17.01
	4851 Temperatura máxima		0.66 - 0.74
	4602 Temperatura mínima		0.65 - 0.89
Arévalo-Mejía (2017)	3018 Precipitación	1980 – 2012	ND*
	3614 Temperatura máxima		0.06 - 0.20
	3614 Temperatura mínima		0.01 - 0.24
	3614 Temperatura ambiente		0.02 - 0.24

* ND – no determinado

Cuervo-Robayo et al. (2013) mencionaron que la diferencia entre sus resultados y los obtenidos previamente por Romero et al. (2009) y Téllez-Valdés (2006) se debe, en gran medida, al número de estaciones empleadas en la estimación. Sin embargo, la presente investigación empleó menos estaciones y obtuvo un margen de error menor. Es posible que este fenómeno se deba a dos factores: i) el método de espacialización empleado y ii) la selección de estaciones bajo criterios estadísticos no paramétricos y variográfico.

Se recomienda que el desarrollo de futuras espacializaciones climáticas tomen en cuenta algunas otras covariables como la distancia al mar. Si se pretende replicar el estudio, se recomienda realizar un ajuste multivariable de orden superior al empleado en la investigación.

Los resultados obtenidos en la presente investigación pueden ser empleados para fines de investigación climática, cambio climático, estimación de índices e indicadores bioclimáticos, insumos en modelos ecológicos, etc. Así mismo, su pueden sugerir áreas idóneas para la habilitación de nuevas estaciones de monitoreo a través de las imágenes de varianza de Kriging.

Por otro lado, las imágenes de precipitación muestran claramente el efecto de intermitencia espacial. Sin embargo, el método desarrollado en SAMPO demanda que el espacio a simular contenga una cantidad considerable de estaciones de monitoreo ya que la fracción de precipitación nula y no nula es estimada a partir de la fracción de datos con $P = 0$ mm y $P > 0$ mm. Por tanto, el programa podría arrojar resultados poco confiables en lugares con pocas estaciones climatológicas.

CAPÍTULO 6

CAMBIO CLIMÁTICO

6.1. Introducción

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el cambio climático se define como la alteración en el estado del clima que puede ser identificada por modificaciones en la media y/o variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado por décadas o más tiempo (IPCC, 2007). Se refiere a cualquier tipo de cambio en el clima, ya sea por variabilidad natural o como resultado de las actividades antrópicas.

La parte natural del cambio es inherente al sistema climático de la Tierra. Un ejemplo de esto es la variación en el ángulo de inclinación de la Tierra que oscila entre los 22.5° y los 24°. El grado de inclinación de la rotación terrestre afecta a la cantidad de luz solar que incide sobre la superficie y altera los patrones climáticos globales. Esta variación es cíclica con periodo aproximado de 41,000 años y es, en gran parte, responsable de las Eras Glaciares que han tenido lugar en nuestro planeta (Smith y Smith, 2007).

La evolución de las actividades socioeconómicas y la sobrepoblación han coadyuvado el estrés por el recurso hídrico (Vörösmarty et al., 2010), particularmente la parte antrópica del cambio climático (Kernan et al., 2010). Existe evidencia que el clima global ha incrementado su temperatura y se observa en los registros de temperatura ambiental y temperatura oceánica, así como en el rápido deshielo de los polos y el incremento del nivel del mar (IPCC, 2007). El incremento de la temperatura en los ríos modifica sus propiedades físico-químicas, mientras que la reducción de la precipitación en verano y el incremento de la evaporación han favorecido el incremento del estrés hídrico (Acreman et al., 2014). Actualmente, los efectos del cambio climático han alterado hidrológicamente los componentes de los ríos (Döll y Zhang, 2010; Moss, 2010; Wilby et al., 2010; Lawrence et al., 2014).

Ante tales cambios, la comunidad científica plantea reconocer los efectos del cambio climático en la dinámica del clima, cuerpos de agua, comportamiento y distribución de especies, afectación de la salud humana, entre otros. Esto se ha logrado a través de métodos estadísticos para identificar tendencias en magnitud y desplazamiento de variables climáticas.

6.1.1. Aporte humano a efectos del cambio climático.

En la atmósfera terrestre existe una concentración natural cuantiosa de diversos compuestos químicos tales como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), nitrógeno (N_2), etc. Dichos compuestos absorben la radiación térmica (de onda larga) emitida por la superficie y la propia atmósfera terrestre. De esta forma, la temperatura de la atmósfera se incrementa y, a su vez, la radiación que emite calienta las capas inferiores. Este fenómeno es conocido como efecto invernadero y los gases responsables como gases de efecto invernadero (Smith y Smith, 2007). La Figura 6.1 muestra el balance de unidades de energía entrantes y salientes de la Tierra. Un sistema en equilibrio implica que las unidades entrantes sean iguales a las unidades salientes.



Figura 6.1 Distribución de la energía solar que alcanza la atmósfera terrestre: radiación solar que alcanza la atmósfera (100 unidades), de las cuales, 30 unidades son reflejadas al espacio, 19 unidades son absorbidas por las nubes y 51 unidades alcanzan la superficie terrestre. De las 51 unidades, se emplean 23 unidades de radiación para la evaporación y 7 unidades para calentar el aire circundante a la tropósfera. La radiación emitida por la superficie terrestre es equivalente a 117 unidades, de las cuales, sólo 6 unidades son dispersadas al espacio y 111 quedan en la atmósfera para crear el efecto invernadero. De las 111 unidades atrapadas por la atmósfera, 96 regresan a la superficie terrestre. Fuente: Smith y Smith, 2007.

De todos los gases de efecto invernadero, el CO_2 está directamente vinculado con las actividades humanas. Este vínculo se agudizó a partir de la segunda mitad del siglo XIX con el apogeo de la revolución industrial. A partir de entonces, la concentración de este gas en la atmósfera se ha ido incrementando, pasando de un crecimiento lineal a uno exponencial (IPCC, 2001). Actualmente, los países desarrollados presentan una mayor emisión de CO_2 a diferencia de los países en vía de desarrollo. Sin embargo, el crecimiento económico de estos últimos ha generado movimientos migratorios por fuentes de empleo, por lo que en algunos años su emisión rebasará sus registros históricos (Tyler y Spoolman, 2015).

Adicional a la producción industrial, la deforestación de árboles y selvas es otra actividad vinculada con el desarrollo humano. Esta práctica se debe, principalmente, a dos factores: i) el cambio de uso de suelo para el fortalecimiento de las actividades agrícolas y ganaderas y ii) el cambio de uso de suelo para el crecimiento de la mancha urbana (Arias et al., 2018; Lejeune et al., 2018; Kumar et al., 2018). La remoción de vegetación se realiza principalmente por medio de incendios forestales para la quema de biomasa y limpieza del terreno que se empleará con otro uso. Este proceso también genera cantidades considerables de CO₂ y reduce las posibilidades de mitigar su concentración al remover los únicos seres vivos que son capaces de transformar el gas invernadero en oxígeno.

El florecimiento de la industria, la deforestación, el cambio de uso de suelo, los incendios forestales, entre otros; son las principales actividades humanas que han propiciado el incremento en la concentración de gases invernadero. Este problema se seguirá intensificando en el futuro mientras no se tomen medidas para controlar el crecimiento poblacional (Poff et al., 2017). Sus efectos impactan directamente a la temperatura de la atmósfera y la dinámica global del clima en la Tierra (Tyler y Spoolman, 2015), así como a las propiedades fisico-químicas de los ríos, la distribución de especies (França-Costa et al., 2018) y la salud del ser humano (San-José et al., 2018).

6.1.2. Efectos del cambio climático en la dinámica global del clima

El desarrollo industrial y las actividades humanas producen un incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, existen otros gases de efecto invernadero que también han incrementado su nivel de concentración: metano (CH₄), clorofluorocarbonatos (CFC), clorofluorocarbonatos hidrógenados (CFCH), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂). Aunque su presencia sea inferior a la del CO₂, algunos de estos gases son mucho más efectivos para absorber el calor atmosférico e intensificar el efecto invernadero en el planeta (Stewardson y Webb, 2010). Esto ha originado que la temperatura global del planeta se eleve en los últimos años.

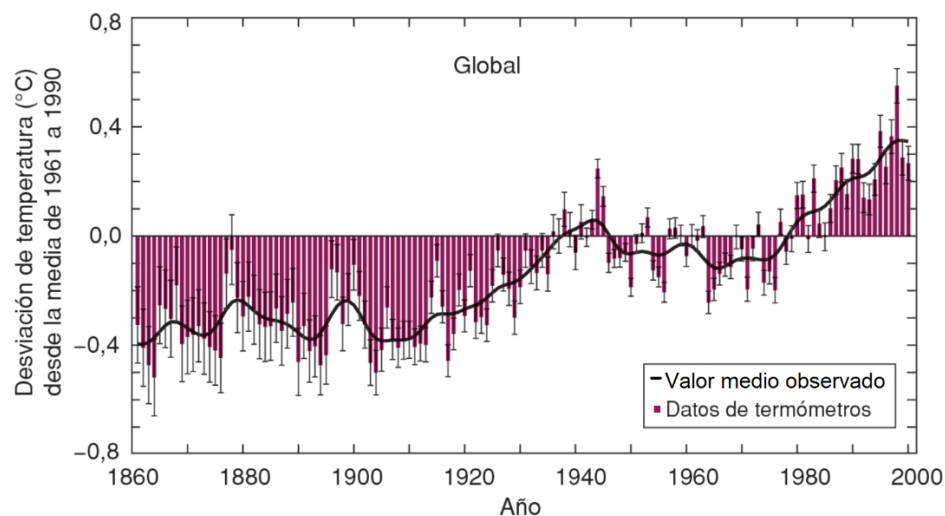


Figura 6.2 Variaciones de temperaturas anuales combinadas del aire de la superficie de la Tierra y de la superficie del océano (1961-2000). Fuente: IPCC (2001).

De la Figura 6.2 se aprecian las variaciones de temperatura anuales combinadas del aire de la superficie de la Tierra y de la superficie del mar ($^{\circ}\text{C}$) desde 1861 hasta 2000. Las variaciones son la diferencia entre la temperatura anual de un año determinado y el promedio de temperatura anual del periodo 1961-1990. Claramente se puede apreciar que la magnitud de la temperatura global de la Tierra se ha incrementado hasta 0.7°C a partir de la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, su tendencia tiene origen desde mediados del siglo XIX aunque en una menor tasa de cambio. Esto ha originado hipótesis que el cambio climático ya estaba presente desde antes de comenzar a realizar observaciones meteorológicas pero sus efectos se agudizaron a partir de la quema de combustibles fósiles a partir del siglo XX (Smith y Smith, 2007).

Las masas de temperatura de aire no se mantienen constantes en todo el planeta, sino que se encuentran en movimiento gracias a la rotación de la Tierra y a las variaciones de la topografía (Ahrens, 2003). La región ecuatorial recibe la mayor entrada de radiación solar. El aire caliente, al ser menos denso, se eleva por encima del aire frío hasta el límite de la atmósfera y genera una zona de bajas presiones. Este fenómeno se mantiene constante hasta que la masa de aire caliente se satura y se espansa con dirección a los polos norte y sur. Lo anterior provoca que la masa de aire caliente se enfríe, descienda y aumente su presión en la superficie. Sin embargo, el incremento en la temperatura de la masa de aire en el Ecuador ha impactado el proceso de enfriamiento en los polos (Figura 6.3). Cada año, se reporta deshielo polar a un ritmo exponencial (IPCC, 2007).

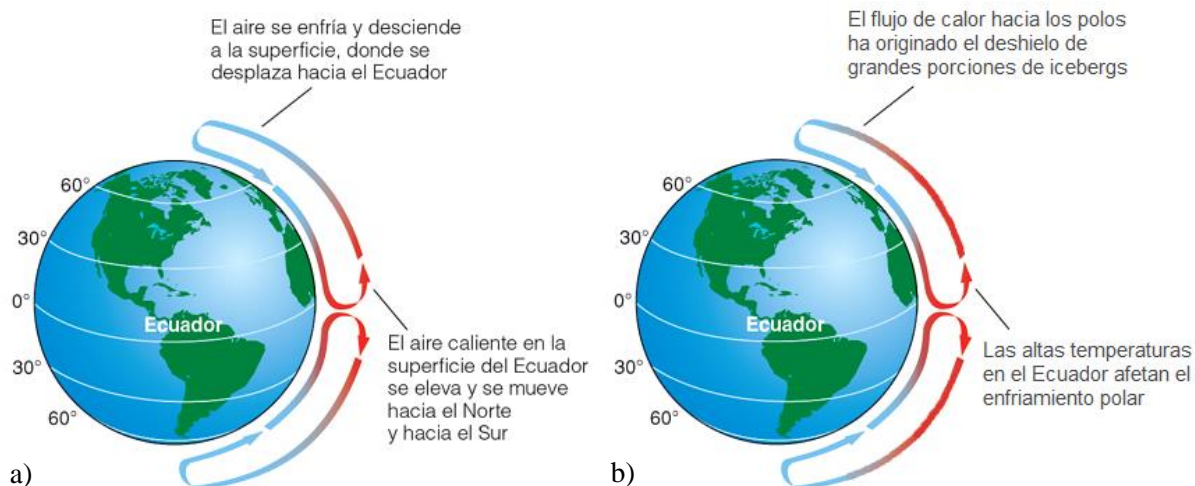


Figura 6.3 a) dinámica normal del movimiento de masas de aire en la Tierra y b) cambios en el ciclo calentamiento-enfriamiento de las masas de aire. Fuente: adaptado de Smith y Smith (2007).

La temperatura del aire juega un papel crucial para el intercambio de agua entre la atmósfera y la superficie terrestre. Cuando el aire de la atmósfera entra en contacto con los cuerpos de agua, ocurre un intercambio de moléculas entre ambos. Así mismo, tiene un alto impacto en

las tasas de evaporación, condensación y, por consecuencia, en las tasas de saturación de vapor de agua en el aire (Hidore et al., 2010). El aire caliente tiene una mayor capacidad de vapor de agua que el aire frío. Esto conlleva alteraciones en la humedad relativa y a la frecuencia de su condensación, trayendo consecuencias en el proceso de formación de nubes (Smith y Smith, 2007). De esta forma, el cambio climático impacta el ciclo de precipitaciones que, aunado a las corrientes de viento, desfasan su distribución espacial. Los efectos de estos desfases se han observado en la prolongación de periodos de sequías en ciertas regiones (Kreyling et al., 2016) y de inundaciones en algunas otras.

Aunque es bien conocido el efecto que el CO₂ genera sobre la dinámica del clima global, sus efectos son inciertos por la gran variabilidad climática presente en la Tierra. Por tal razón, corresponde a los científicos, gestores y tomadores de decisión de cada región tomar medidas de prevención y/o adaptación al cambio climático (Stewarson y Webb, 2010; Piniewski, 2011). Por su parte, la comunidad científica ha desarrollado Modelos de Circulación General (MCG) para predecir variaciones, en patrones del clima global a gran escala, generados por gases de efecto invernadero (IPCC, 2011; IPCC, 2007; IPCC, 2015). Aunque todos los MCG muestran una gran incertidumbre sobre las posibles tendencias de cambio en temperatura y precipitación global, coinciden en que dichas variables climáticas muestran un incremento que se agudizará en el futuro (Figura 6.4).

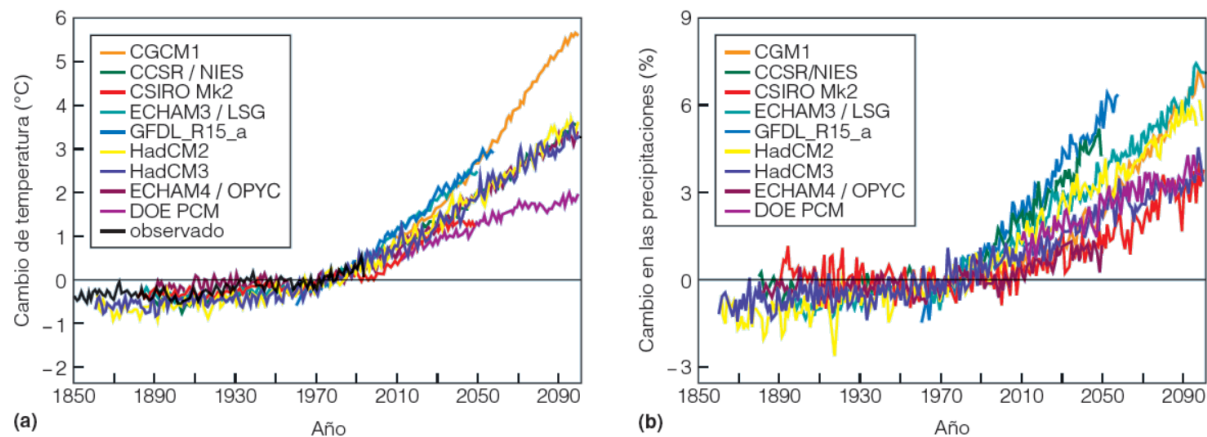


Figura 6.4 Comparación de patrones pronosticados: a) temperatura global promedio y b) cambio en las precipitaciones globales. Los cambios se comparan con el valor promedio del periodo 1961-1990. Fuente: IPCC (2001).

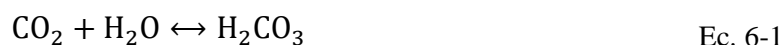
6.1.3. Efectos del cambio climático en ríos y cuerpos de agua

Al entrar en contacto las corrientes de viento húmedo con los cuerpos de agua, se genera un intercambio de oxígeno por difusión donde las moléculas de H₂O se mueven de una región de alta concentración a regiones de baja concentración. Desde el punto de vista metabólico, la difusión permite la transferencia de dos gases importantes para la vida acuática: el oxígeno

(O₂) y el dióxido de carbono (CO₂). La solubilidad de dichos gases está en función de la temperatura, presión y salinidad ([Smith y Smith, 2007](#)).

En el caso del O₂, el valor de saturación es mayor en agua fría que en agua caliente, porque la solubilidad de un gas en el agua disminuye con el incremento de la temperatura. Sin embargo, la solubilidad aumenta con el incremento de la presión atmosférica y disminuye con el aumento de la salinidad. El movimiento de las corrientes superficiales y profundas del agua permiten que el O₂, transferido por difusión en las capas superficiales, se distribuya hacia las capas profundas de los cuerpos de agua. Sin embargo, su concentración disminuye con la profundidad debido a la demanda de los organismos descomponedores en el fondo de los sedimentos. En general, dicha concentración limita la respiración y la actividad metabólica de las comunidades de ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, la solubilidad del CO₂ es distinta debido a que reacciona con el agua cuando entran en contacto. Debido a que el agua tiene una capacidad significativa para la absorción del CO₂, este gas se encuentra presente en cuerpos de agua dulce y salada. Tras difundirse en la superficie por las corrientes de viento, el CO₂ reacciona con el H₂O y produce ácido carbónico (H₂CO₃).



El ácido carbónico, a su vez, se disocia y forma un ión de hidrógeno y un ión de bicarbonato.



A la vez, el bicarbonato puede disociarse y formar otro ión de hidrógeno y un ión de carbonato.



El sistema dióxido de carbono – ácido carbónico – bicarbonato – carbonato es un sistema químico de gran complejidad que tiende a estar en equilibrio. En consecuencia, si se grega una mayor cantidad de CO₂ en el agua, el equilibrio se rompe y las ecuaciones presentadas van hacia la derecha. Como resultado, se producen y absorben iones de hidrógeno (H⁺) libres en el agua. Cuando más alto el número de iones H⁺, más ácida se vuelve la solución.

Por otro lado, el incremento de la temperatura en la atmósfera y superficie terrestre tiene efectos directos en la temperatura del agua de cualquier cuerpo de agua: icebergs, glaciares, lagos, lagunas, ríos, humedales, estuarios, etc ([Wilby, 2010](#)). Cualquier modificación en el régimen termal e hidrológico del cauce tiene efectos directos en altas temperaturas del agua, deshielo prematuro en capas superficiales de ríos, corta duración del periodo de heladas en ríos, incremento en la estratificación del río, variaciones en magnitud y duración de sequías e inundaciones, alteraciones en el régimen de sedimentos y transporte de nutrientes, disminución

de la concentración de oxígeno disuelto, incremento en la salinidad, entre otros (Kundzewicz, et al., 2007; Whitehead, Wade y Butterfield, 2009a; Whitehead et al., 2009b; Poff et al., 2017).

La alteración del régimen termal en los cuerpos de agua producen modificaciones en la disipación de la temperatura en el perfil vertical de profundidad (Figura 6.5) (Irvin et al, 2017). En consecuencia, se modifica la región del perfil vertical de profundidad donde se produce la disminución de temperatura más rápida (termoclina). Así mismo, se ensancha el espesor de la capa superior de agua más cálida y menos densa (epilimnion) a costa de un estrechamiento de la capa inferior de agua fría y más densa (hipolimnion) (Smith y Smith, 2007; Tyler y Spoolman, 2015).

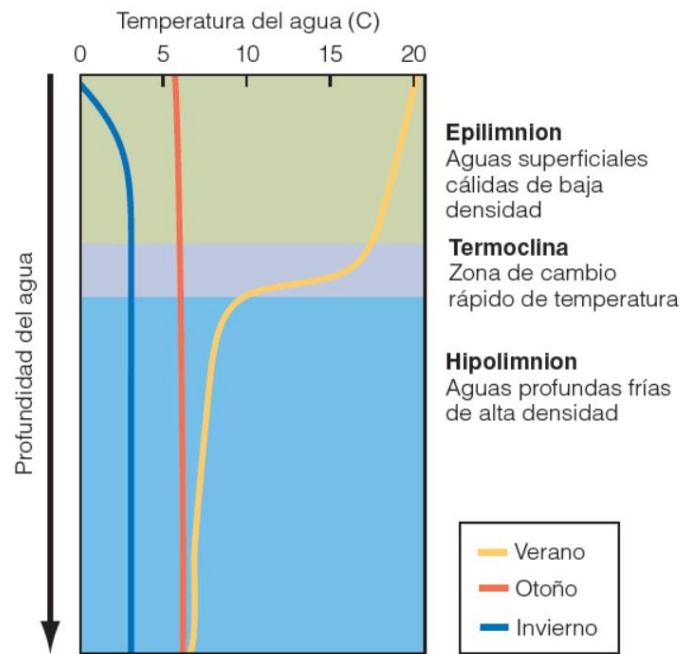


Figura 6.5 Perfil de temperatura con profundidad de agua de una masa de agua abierta como un lago o una laguna. Fuente: Smith y Smith (2007).

El ensanchamiento del epilimnion facilita el incremento en el porcentaje de evaporación en los cuerpos de agua. Lo anterior impacta directamente a las tasas de infiltración y reduce el caudal base de ríos y arroyos, lo que intensifica la alteración de su régimen hidrológico (Lawrence et al., 2014; Thompson et al., 2014). Se ha observado que las variaciones en los regímenes producen modificaciones en la morfología de paisajes naturales como: zonas costeras (Richards, Mokrech, Berry y Nicholls, 2008), humedales (Harrison et al., 2008), praderas (Orr et al., 2008), escurrimientos glaciares (Milner, Brown y Hannah, 2009), lagos (Mooji et al., 2005), estuarios (Johnson et al., 2009) y cualquier ecosistema acuático (Arthington, 2012; Olden et al., 2014; Tonkin et al., 2017).

El en caso particular de los ríos, la disminución del tirante hidráulico permite que los cuerpos de agua subterráneos aporten un cierto volumen de agua al río, convirtiéndolo en efluente

(Figura 6.6a). Sin embargo, la sobreexplotación de acuíferos y las altas tasas de evaporación, han modificado el estado efluente de los ríos en influentes conectados (Figura 6.6b) donde el río vierte un porcentaje de sus aguas a los acuíferos (Döll, Fiedler y Zhang, 2009; Döll y Zhang, 2010). Los influentes conectados corren el riesgo de convertirse en influentes desconectados (Figura 6.6c) de no contar con un programa táctico que regule los volúmenes concesionados de extracción de agua. De esta forma, se modifican algunos parámetros fisicoquímicos de las aguas superficiales tales como la temperatura (Irvine et al., 2017). El desenlace final de un influente desconectado se observa en periodos prolongados de sequía y desertificación (Kreyling et al., 2016; Kelemen, Gillikin y Bouillon, 2018).

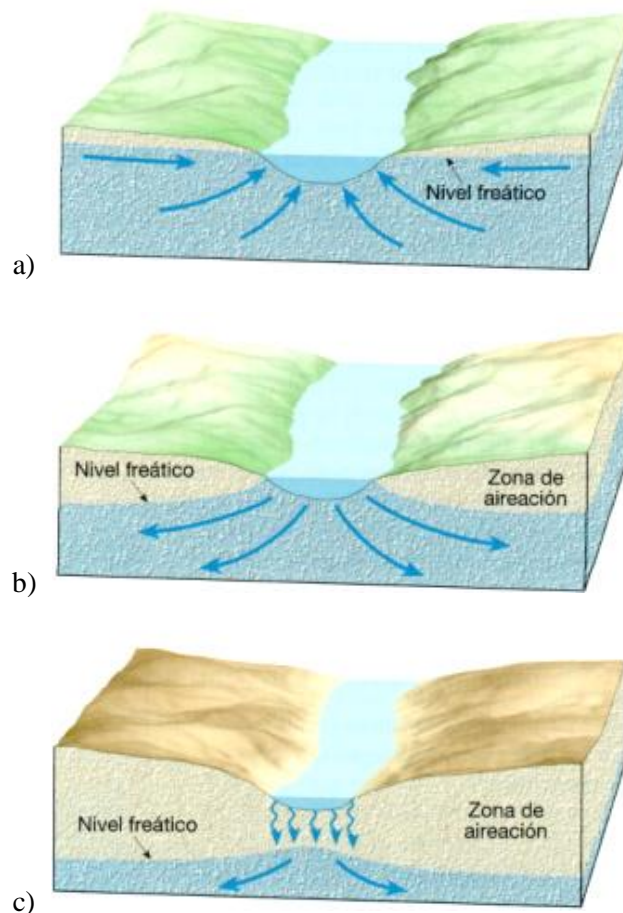


Figura 6.6 Interacción de aguas subterráneas y superficiales: a) efluente; b) influente conectado y c) influente desconectado. Fuente: Tarbuck y Ludgens (2012).

6.1.4. Efectos del cambio climático en especies

Los cambios en cualquier componente del ambiente físico del hábitat, implican directamente modificaciones en las comunidades de especies (Webb, Arthington y Olden, 2017). Sin embargo, la modelación de sus respuestas ante efectos del cambio climático no es fácilmente predecible debido a la complejidad de las interacciones de las comunidades en el ecosistema y

a la plasticidad (adaptación) de cada especie a variaciones climáticas e hidrológicas (Tyler y Spoolman, 2015). Estas incertidumbres biológicas se ven magnificadas por las incertidumbres inherentes al cambio en la dinámica climática.

En el caso de las especies riparias, la variabilidad termal e hidrológica de los ríos representa modificaciones en patrones de comportamiento, cambios fisiológicos, fenológicos, tendencias de dispersión y distribución, predación, entre otros. A una escala mayor, se presentan alteraciones en la estructura propia del ecosistema, tasas de productividad, ciclo de nutrición y modificaciones en las interacciones de comunidades (Wilby, 2010). Sus efectos potenciales han sido observados en especímenes de fitoplancton (Tackeray, Jones y Maberly, 2008), invertebrados (Durance y Ormerod, 2007), anfibios (Araujo et al., 2004), macrófitas (Franklin, Dunbar y Whitehead, 2008), peces (Graham y Harrod, 2009) y aves acuáticas (Poiani, 2006).

El CO_2 fluye desde la atmósfera a los ecosistemas terrestres a través de la fotosíntesis. Las elevadas tasas de concentración del CO_2 en el ambiente tiene dos efectos directos a corto plazo sobre las plantas. El primero de ellos es el incremento en la tasa de fotosíntesis en las células del mesófilo, ya que el CO_2 se difunde de la atmósfera a las hojas a través de los estomas (Figura 6.7). Cuando mayor sea la concentración de CO_2 , mayor será la tasa de difusión en las hojas; dando génesis al efecto de fertilización de CO_2 .

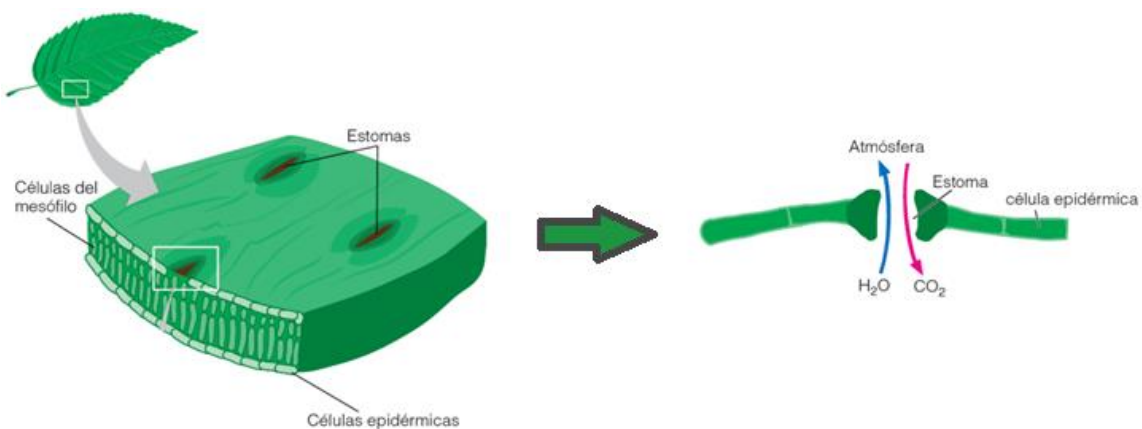


Figura 6.7 Difusión de dióxido de carbono en las hojas a través de los estomas. Fuente: adaptada de Smith y Smith (2007).

El segundo efecto es el cierre parcial del estoma para reducir la pérdida de agua por transpiración. Esto aumenta la eficiencia de las plantas en el uso del agua (absorción de carbono/pérdida de agua). Sin embargo, sus efectos pueden ser variados y más complicados de lo esperado. Por ejemplo, Poorter y Pérez-Soba (2002) realizaron 600 estudios experimentales donde se examinó el crecimiento de las plantas, de las tres vías fotosintéticas C_3 , C_4 y CAM, a altas concentraciones de CO_2 . Sus resultados revelan una proporción de aumento de la biomasa (PAB) para los tres tipos fotosintéticos (Figura 6.8a). El tipo fotosintético con PAB más notable fueron las plantas de cultivo tipo C_3 con un crecimiento medio de 59%. Sin embargo, en

algunas plantas se observó que su crecimiento, por exposición a altas concentraciones de CO_2 , es de corta duración debido a que producen menos enzima fotosintética (Figura 6.8b).

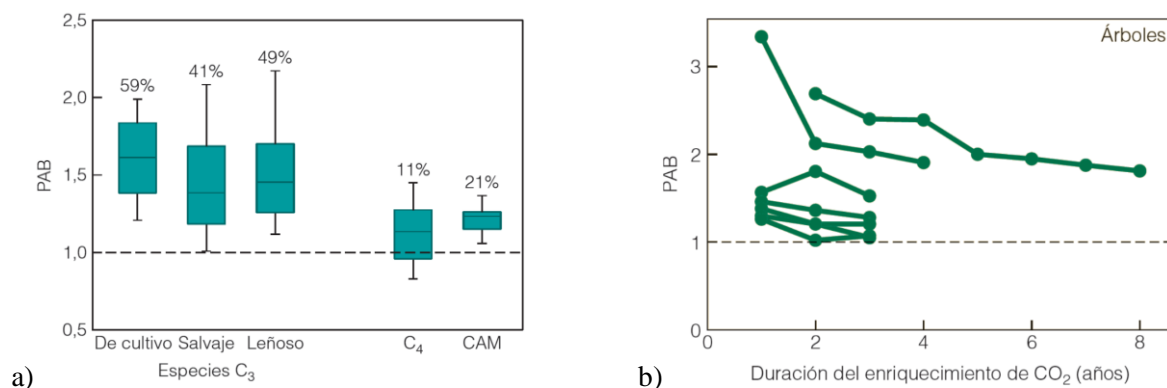


Figura 6.8 Resultados observados en el crecimiento de diferentes tipos de plantas expuestas a altas concentraciones de CO_2 : a) distribución de la proporción del aumento de la biomasa (PAB) y b) evolución del PAB debido a las altas concentraciones de CO_2 . Fuente: adaptada de [Poorter y Pérez-Soba \(2002\)](#)

El efecto conjunto de las alteraciones en los regímenes de temperatura, precipitación, humedad y concentración de CO_2 modifica la distribución espacial y la abundancia de especies vegetales. Al cambiar alguna de ellas, llevará a la especie a adaptarse o desplazarse a algún sitio con las características adecuadas para su crecimiento.

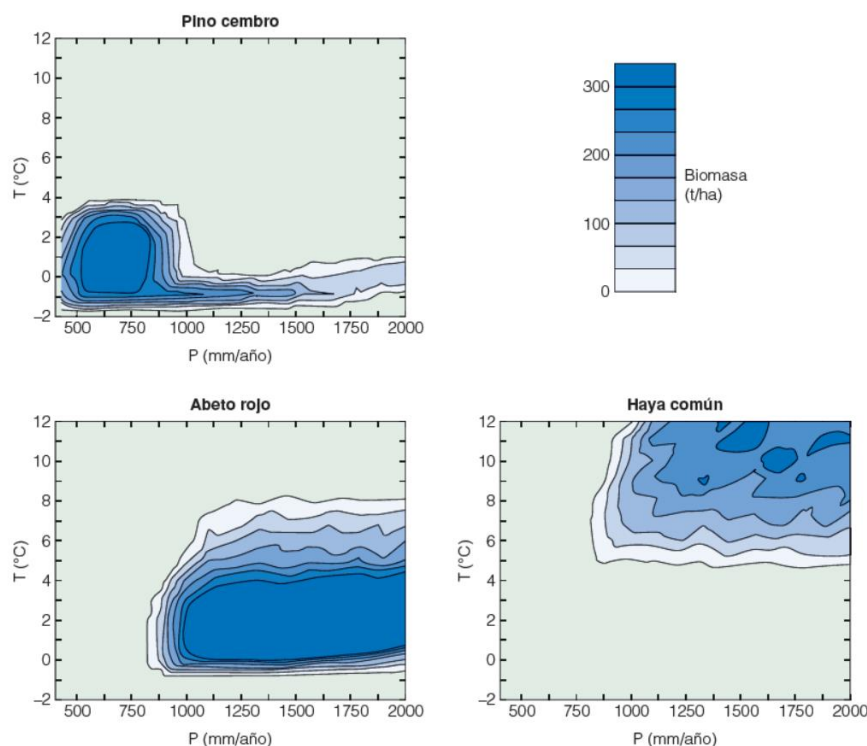


Figura 6.9 Abundancia (biomasa t/ha) de tres especies de árboles comunes en Europa relacionada con la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$) y la precipitación total anual (mm/año).

La distribución, riqueza y abundancia entre las poblaciones de especies animales también están sujetas a las variaciones locales y globales del clima (Kuczynski, Legendre y Grenouillet, 2017). La temperatura, por ejemplo, está estrechamente relacionada con el ciclo de vida de los organismos (Figura 6.10). A su vez, restringe la distribución espacial de las especies en función de sus características de plasticidad y preferencias de hábitat. Las preferencias de hábitat de cada especie es un punto clave, y a la vez limitante, para favorecer la especiación y transmisión genética entre individuos (Lang et al., 2017). Por ejemplo, existen poblaciones de peces que tienen preferencia hacia las aguas de temperatura templada donde pueden desarrollarse y reproducirse. Si la temperatura se reduce, el tamaño de la población entrará en periodo de estrés hasta su posible extinción del nicho. El mismo efecto se presentará si la temperatura del agua se incrementa.

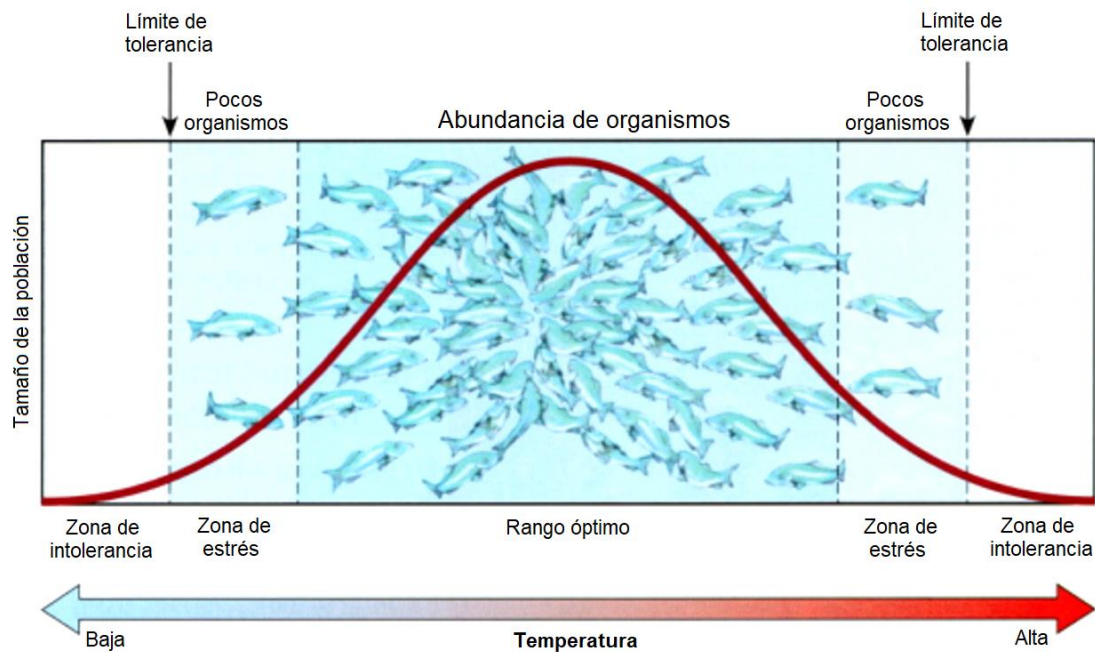


Figura 6.10 Rango de tolerancia de una población de peces ante la variación de la temperatura. Fuente: adaptada de Tyler y Spoolman (2015).

Desde el nacimiento de los ríos a su desembocadura, los ecosistemas riparios se encuentran en constante cambio (Figura 6.11). Los tributarios aguas arriba generalmente son veloces, fríos y cuentan con una amplia sombra proveniente de zonas forestales densas. La producción principal es baja y dependen del ingreso de detritus de la vegetación terrestre de las orillas, que contribuye con más del 90% de los aportes orgánicos. Con el aumento de la anchura de los arroyos, disminuye la importancia de la vegetación ribereña. Al estar expuesta a la luz solar, la temperatura del agua aumenta mientras el gradiente de altitud disminuye por lo que la corriente disminuye su velocidad. Estos cambios hacen variar el aporte de las partículas orgánicas terrestres, así como la producción primaria de algas y plantas acuáticas enraizadas. El tipo de comunidades presentes cambia de especies de agua fría a especies de agua cálida.

En la desembocadura, el ancho de los ríos es mayor, la velocidad es mucho más lenta y hay un rico depósito de sedimentos que se acumulan en el fondo.

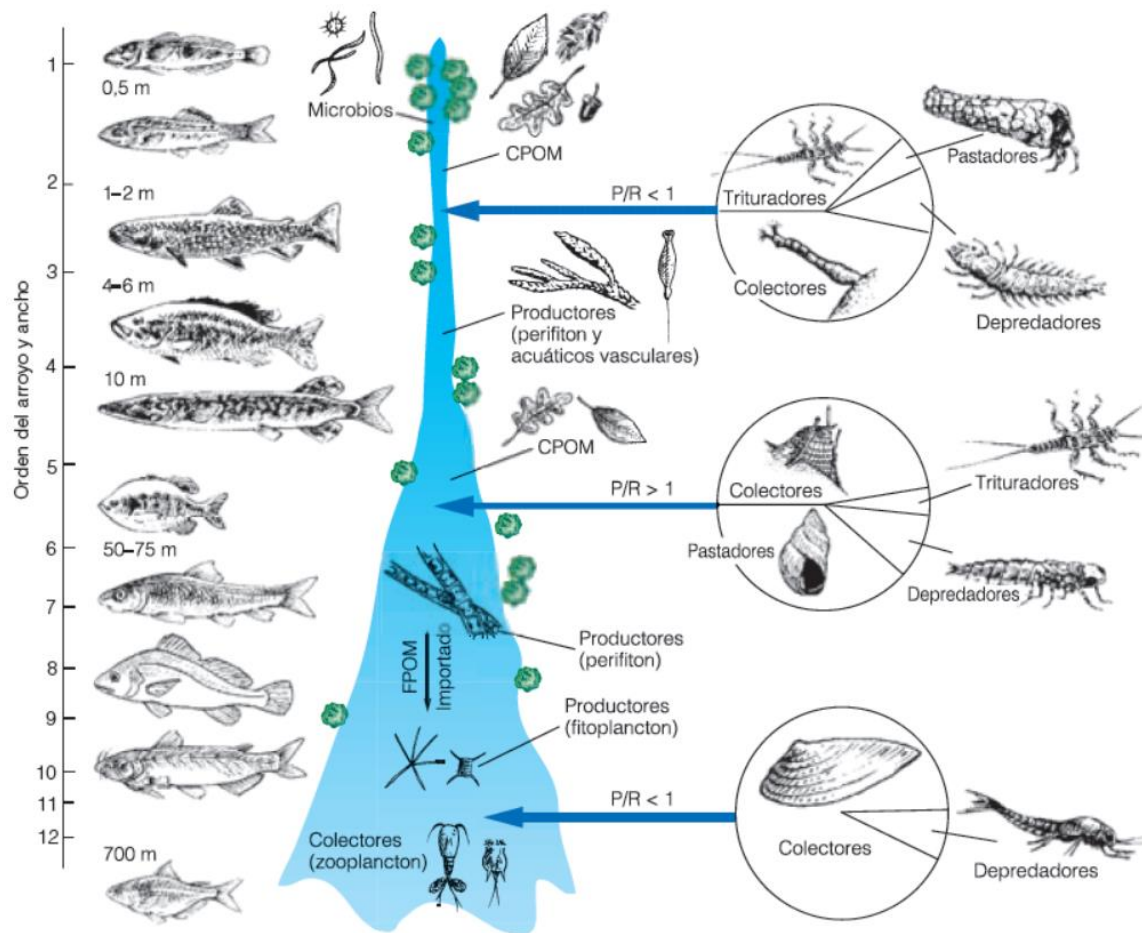


Figura 6.11 Cambios en los grupos consumidores a lo largo del corredor fluvial. La escala de la izquierda muestra el orden del arroyo y el ancho de este (m). Donde CPOM y FPOM son materia orgánica de partícula gruesa y fina respectivamente. Fuente: [Smith y Smith \(2007\)](#).

Las características de cada especie (producto de una larga historia de evolución, adaptación y especiación para la transferencia genética), las condiciones físicas del hábitat y su dinámica determinan la posible distribución espacial de cada especie. Cuando más de una especie se encuentra en la misma ubicación geográfica, se inicia una competencia por los recursos naturales y el dominio del hábitat. Las interacciones entre diferentes especies dan génesis a cadenas de complejas relaciones entre ellas (e.g: cadena trófica) (Figura 6.12). Estas interacciones quedan sujetas al ciclo natural de desarrollo de una población que, a su vez, está sujeta a las variaciones climáticas ([França-Costa et al., 2018](#)). Si alguna especie se extingue, las interacciones entre las poblaciones se ven afectadas debido a la dependencia de nutrientes necesarios para el desarrollo de su ciclo de vida. Estas modificaciones son complejas de modelar y presentan una gran incertidumbre, ya que la plasticidad de cada especie es única e impredecible ([Timpane-Padgham, Beechie y Klinger, 2017](#)).

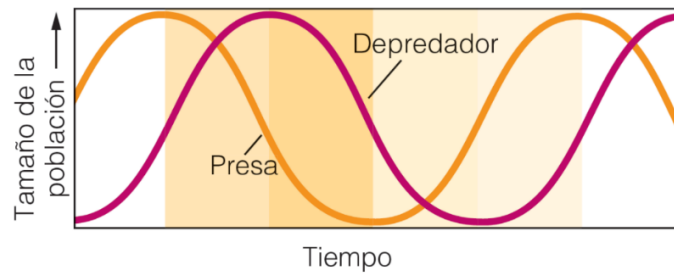


Figura 6.12 Cambios implícitos en los tamaños de poblaciones de depredadores y presas a lo largo del tiempo. Fuente: [Smith y Smith \(2007\)](#).

6.1.5. Adaptación al cambio climático

Como se ha visto en secciones anteriores, las variaciones en la dinámica del clima impactan a procesos físicos, metabólicos y de comportamiento de la naturaleza donde ocurren. Predecir las tendencias de variabilidad y/o desfase de la temperatura, precipitación y humedad, así como mitigar los posibles efectos sobre el medio ambiente, es un objetivo de la Ley General de Cambio Climático en México ([DOF, 2012](#)). Sin embargo, diversos estudios de técnicas de adaptación al cambio climático, en ríos y cuerpos de agua, reconocen dos principales vías de acción: i) el incremento de vegetación a orillas de los cuerpos de agua, ya que de la sombra de los árboles regula la temperatura en los cauces; e ii) implementar un régimen de caudal ecológico consistente con las condiciones regionales y monitoreado continuamente, ya que regula la cantidad y calidad del recurso hídrico que transita ([Webb et al., 2015](#); [Kuczynski et al., 2017](#)).

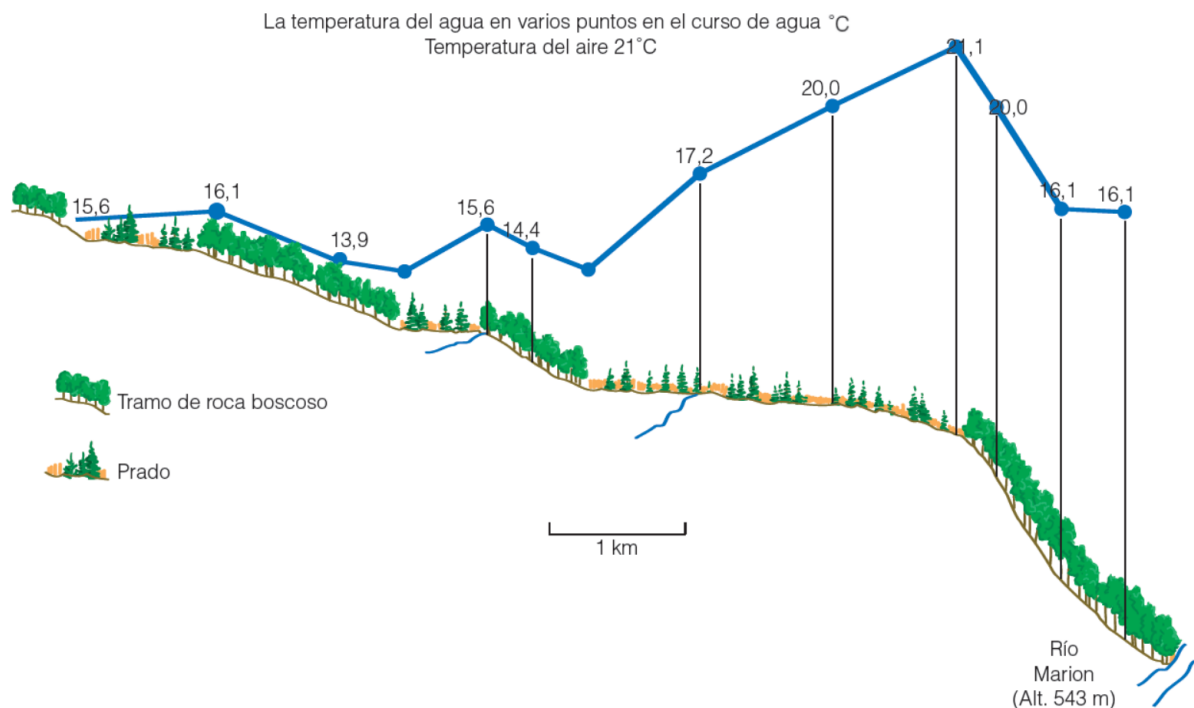


Figura 6.13 Perfil del río Bear en Nueva York, USA y gráfico de temperaturas en su cauce. Fuente: [Smith y Smith \(2007\)](#).

6.2. Métodos estadísticos no paramétricos para evaluar el cambio climático

El presente trabajo de investigación pretende conocer las variaciones y tendencias presentes en la temperatura y precipitación de México. Por tal razón, se estiman 27 índices de cambio climático (ICC) propuestos por el Equipo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI, por sus siglas en inglés) (2015). Sin embargo, es importante señalar que la construcción de escenarios de cambio climático y la aplicación de modelos de respuesta especie-cambio climático, quedan fuera del marco de la presente investigación.

6.2.1. Índices de cambio climático del ETCCDI.

Dentro de la amplia gama de ICC evaluar las variaciones en el clima por efectos del cambio climático, el ETCCDI propone un conjunto de 27 ICC para valorar las alteraciones en la temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación de una región dada (ETCCDI, 2015). 16 índices analizan la variabilidad en duración, magnitud y estacionalidad de la temperatura. Adicionalmente, 11 índices analizan los mismos componentes para la precipitación. La escala temporal requerida para la estimación de los ICC es diaria, mensual y anual. Cada uno de los índices se describen de forma sucinta en los párrafos siguientes.

Índices para análisis del régimen de temperatura

FD0 - Número de días fríos: corresponde al conteo anual de días cuya temperatura mínima diaria sea inferior a los 0°C.

$$FD0 = \sum_{i=1}^{n_j} (T_{min_{ij}} < 0^{\circ}C) \quad \text{Ec. 6-4}$$

Donde: $FD0$ es el número de días fríos; $T_{min_{ij}}$ es la temperatura mínima del día i en el año j ; n_j es el número de días del año j .

SU25 - Número de días cálidos: corresponde al conteo anual de días cuya temperatura máxima diaria sea mayor a los 25°C.

$$SU25 = \sum_{i=1}^{n_j} (T_{max_{ij}} > 25^{\circ}C) \quad \text{Ec. 6-5}$$

Donde: $SU25$ es el número de días cálidos; $T_{max_{ij}}$ es la temperatura máxima del día i en el año j ; n_j es el número de días del año j .

ID0 - Número de días gélidos: corresponde al conteo anual de días cuya temperatura máxima diaria sea menor a los 0°C.

$$ID0 = \sum_{i=1}^{n_j} (T_{max_{ij}} < 0^{\circ}C) \quad \text{Ec. 6-6}$$

Donde: $ID0$ es el número de días gélidos; $T_{max_{ij}}$ es la temperatura máxima del día i en el año j ; n_j es el número de días del año j .

TR20 - Número de noches tropicales: corresponde al conteo anual de días cuya temperatura mínima diaria sea mayor a los $20^{\circ}C$.

$$TR20 = \sum_{i=1}^{n_j} (T_{min_{ij}} > 20^{\circ}C) \quad \text{Ec. 6-7}$$

Donde: $TR20$ es el número de noches tropicales; $T_{min_{ij}}$ es la temperatura mínima del día i en el año j ; n_j es el número de días del año j .

GSL - Duración del crecimiento de temporada: corresponde al conteo anual de por los menos 6 días consecutivos con temperatura media diaria mayor a $5^{\circ}C$ (a partir del 1° de enero para el hemisferio norte) o 6 días consecutivos con temperatura media diaria menor a $5^{\circ}C$ (a partir del 1° de julio para el hemisferio sur).

$$GSL \begin{cases} GSL_{NH} = \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{T}_{ij} > 5^{\circ}C) & \forall GSL_{NH} \geq 6 \text{ days} \\ GSL_{SH} = \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{T}_{ij} < 5^{\circ}C) & \forall GSL_{SH} \geq 6 \text{ days} \\ 0 & \forall GSL_{NH} \vee GSL_{SH} < 6 \text{ days} \end{cases} \quad \text{Ec. 6-8}$$

Donde: GSL_{NH} la duración del crecimiento de la temporada para el polo norte (contada a partir del 1° de enero al 31 de diciembre); GSL_{SH} es la duración del crecimiento de la temporada para el polo sur (contada a partir del 1° de julio al 30 de junio); \bar{T}_{ij} es la temperatura media diaria del día i en el año j ; n_j es el número de días en el año j .

TX_x - Máximo mensual de la temperatura máxima diaria: corresponde al máximo mensual de la temperatura máxima diaria.

$$TX_x = \max(T_{max_{kj}}) \quad \text{Ec. 6-9}$$

Donde: TX_x es el máximo mensual de la temperatura máxima diaria; $T_{max_{kj}}$ es la temperatura máxima diaria en el mes k del año j .

TN_x - Máximo mensual de la temperatura mínima diaria: corresponde al máximo mensual de la temperatura mínima diaria.

$$TN_x = \max(Tmin_{kj}) \quad \text{Ec. 6-10}$$

Donde: TN_x es el máximo mensual de la temperatura mínima diaria; $Tmin_{kj}$ es la temperatura mínima diaria del mes k en el año j .

TXn - Mínimo mensual de la temperatura máxima diaria: corresponde al mínimo mensual de la temperatura máxima diaria.

$$TX_n = \min(Tmax_{kj}) \quad \text{Ec. 6-11}$$

Donde: TX_n es el mínimo mensual de la temperatura máxima diaria; $Tmax_{kj}$ es la temperatura máxima diaria del mes k en el año j .

TNn - Mínimo mensual de la temperatura mínima diaria: corresponde al mínimo mensual de la temperatura mínima diaria.

$$TN_n = \min(Tmin_{kj}) \quad \text{Ec. 6-12}$$

Donde: TN_n es el mínimo mensual de la temperatura mínima diaria; $Tmin_{kj}$ es la temperatura mínima diaria del mes k en el año j .

TN10p - Porcentaje de días con $Tmin_{ik} < P_{10Tmin}$: porcentaje mensual del número de días en los que la temperatura mínima diaria es menor que el 10 percentil móvil de 5 días consecutivos.

$$TN_{10P} = 100 * \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (Tmin_{ik} < P_{10Tmin})}{n_k} \right] \quad \text{Ec. 6-13}$$

Donde: TN_{10P} es el porcentaje de noches frescas; $Tmin_{ik}$ es la temperatura mínima diaria del día i en el mes k ; P_{10Tmin} es el 10 percentil de un periodo móvil de 5 días consecutivos; n_k es el número de días del mes k .

TX10p - Porcentaje de días con $Tmax_{ik} < P_{10Tmax}$: porcentaje mensual del número de días en los que la temperatura máxima diaria es menor que el 10 percentil móvil de 5 días consecutivos.

$$TX_{10P} = 100 * \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (Tmax_{ik} < P_{10Tmax})}{n_k} \right] \quad \text{Ec. 6-14}$$

Donde: TX_{10P} es el porcentaje de días frescos; $Tmax_{ik}$ es la temperatura máxima del día i en el mes k ; P_{10Tmax} es el 10 percentil de un periodo móvil de 5 días consecutivos; n_k es el número de días del mes k .

TN90p - Porcentaje de días con $Tmin_{ik} > P_{90Tmin}$: porcentaje mensual del número de días en los que la temperatura mínima diaria es mayor que el 90 percentil móvil de 5 días consecutivos.

$$TN_{90P} = 100 * \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (Tmin_{ik} > P_{90Tmin})}{n_k} \right] \quad \text{Ec. 6-15}$$

Donde: TN_{90P} es el porcentaje de noches cálidas; $Tmin_{ik}$ es la temperatura mínima del día i en el mes k ; P_{90Tmin} es el 90 percentil de un periodo móvil de 5 días consecutivos; n_k es el número de días del mes k .

TX90p - Porcentaje de días con $Tmax_{ik} > P_{90Tmax}$: porcentaje mensual del número de días en los que la temperatura máxima diaria es menor que el 90 percentil móvil de 5 días consecutivos.

$$TX_{90P} = 100 * \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (Tmax_{ik} > P_{90Tmax})}{n_k} \right] \quad \text{Ec. 6-16}$$

Donde: TX_{90P} es el porcentaje de días cálidos; $Tmax_{ik}$ es la temperatura máxima del día i en el mes k ; P_{90Tmax} es el 90 percentil de un periodo móvil de 5 días consecutivos; n_k es el número de días del mes k .

WSDI - Índice de duración de onda de calor: corresponde al conteo anual de días en los que la temperatura máxima diaria es mayor que el décimo noveno percentil móvil de 5 días consecutivos.

$$WSDI = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_j} (Tmax_{ij} > P_{90Tmax}) & \forall WSDI \geq 6 \text{ días consecutivos} \\ 0 & \forall WSDI < 6 \text{ días consecutivos} \end{cases} \quad \text{Ec. 6-17}$$

Donde: $WSDI$ es el índice de duración de onda de calor; $Tmax_{ij}$ es la temperatura máxima del día i en el año j ; P_{90Tmax} es el 90° percentil de un periodo móvil de 5 días consecutivos; n_j es el número de días del año j .

CSDI - Índice de duración de onda de frío: corresponde al conteo anual de días en los que la temperatura mínima diaria es menor que el décimo percentil móvil de 5 días consecutivos.

$$CSDI = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_j} (Tmin_{ij} < P_{10Tmin}) & \forall CSDI \geq 6 \text{ días consecutivos} \\ 0 & \forall CSDI < 6 \text{ días consecutivos} \end{cases} \quad \text{Ec. 6-18}$$

Donde: $CSDI$ es el índice de duración de onda de frío; $Tmin_{ij}$ es la temperatura mínima del día i en el año j ; P_{10Tmin} es el 10° percentil de un periodo móvil de 5 días consecutivos; n_j es el número de días del año j .

DTR - Rango de temperatura diurna: diferencia mensual promedio entre la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria.

$$DTR = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} (T_{max_{ik}} - T_{min_{ik}})}{n_k} \quad \text{Ec. 6-19}$$

Donde: DTR es el rango de temperatura diurna; $T_{max_{ik}}$ es la temperatura máxima del día i en el mes k ; $T_{min_{ik}}$ es la temperatura mínima del día i en el mes k ; n_k es el número de días del mes k .

Índices para análisis de régimen de precipitación

Rx1d - Precipitación máxima mensual de 1 día: corresponde a la precipitación máxima mensual de 1 día.

$$Rx1d = \max(R_{ik}) \quad \text{Ec. 6-20}$$

Donde: $Rx1d$ es la precipitación máxima mensual de 1 día; R_{ik} precipitación diaria del día i en el mes k .

Rx5d - Precipitación máxima mensual de 5 días consecutivos: corresponde a la precipitación máxima mensual de 5 días consecutivos.

$$Rx5d = \max(R_{5ik}) \quad \text{Ec. 6-21}$$

Donde: $Rx5d$ es la precipitación máxima mensual de 5 días consecutivos; R_{5ij} precipitación móvil de 5 días consecutivos en el mes k .

SDII - Índice de intensidad de precipitación: corresponde a la relación anual del total de precipitación en días húmedos entre el número de los mismos días. Entiéndase por día húmedo aquel cuya lámina de precipitación diaria sea mayor o igual a 1 mm, $R_{ij} \geq 1 \text{ mm}$.

$$SDII = \frac{\sum_{i=1}^{n_w} R_{wj}}{n_w} \quad \text{Ec. 6-22}$$

Donde: $SDII$ es el índice de intensidad de precipitación; R_{wj} es la precipitación de días húmedos en el año j ; n_w es el número de días húmedos en el año j .

R10 - Número de días con precipitación intensa: se define como el conteo anual del número de días cuya lámina de precipitación diaria sea mayor que 10 mm.

$$R10 = \sum_{i=1}^{n_j} (R_{ij} \geq 10 \text{ mm}) \quad \text{Ec. 6-23}$$

Donde: $R10$ es el número de días con precipitación intensa; R_{ij} es la cantidad de precipitación diaria del día i en el año j ; n_j es el número de días en el año j .

R20 - Número de días con precipitación muy intensa: se define como el conteo anual del número de días cuya lámina de precipitación diaria sea mayor que 20 mm.

$$R20 = \sum_{i=1}^{n_j} (R_{ij} \geq 20 \text{ mm}) \quad \text{Ec. 6-24}$$

Donde: $R20$ es el número de días con precipitación muy intensa; R_{ij} es la precipitación diaria del día i en el año j ; n_j es el número de días del año j .

Rnn - Número de días con precipitación mayor que nn mm: corresponde al conteo anual de días cuya lámina de precipitación diaria sea mayor que alguna cantidad en milímetros dada por el usuario.

$$Rnn = \sum_{i=1}^{n_j} (R_{ij} \geq nn \text{ mm}) \quad \text{Ec. 6-25}$$

Donde: Rnn es el número de días cuya precipitación es mayor que nn mm; R_{ij} es la cantidad de precipitación registrada el día i en el año j ; nn es una cantidad de precipitación dada por el usuario; n_j número de días en el año j .

CDD - Máxima duración de la temporada de estiaje: se define como el máximo número de días consecutivos con una lámina de precipitación diaria menor que 1 mm.

$$CDD = \max \left[\sum_i^k (R_{ij} < 1 \text{ mm}) \right] \quad \text{Ec. 6-26}$$

Donde: CDD es la máxima duración de la temporada de estiaje en días; R_{ij} es la cantidad de precipitación del día i en el año j ; k es la cantidad de días consecutivos con $R_{ij} < 1 \text{ mm}$.

CWD - Máxima duración de la temporada de lluvia: se define como el máximo número de días consecutivos con una lámina de precipitación diaria mayor o igual a 1 mm.

$$CWD = \max \left[\sum_i^k (R_{ij} \geq 1 \text{ mm}) \right] \quad \text{Ec. 6-27}$$

Donde: CDD es la máxima duración de la temporada de lluvia en días; R_{ij} es la cantidad de precipitación del día i en el año j ; k es la cantidad de días consecutivos con $R_{ij} \geq 1 \text{ mm}$.

R95p - Precipitación total de días muy húmedos: corresponde a la precipitación total anual de días húmedos cuya lámina de precipitación es mayor que el 95 percentil de precipitación de días húmedos. Entiéndase por día húmedo aquel cuya lámina de precipitación diaria sea mayor o igual a 1 mm, $R_{ij} \geq 1 \text{ mm}$.

$$R_{95P} = \sum_{i=1}^{n_w} R_{wj} \quad \text{where} \quad R_{wj} > P_{95R} \quad \text{Ec. 6-28}$$

Donde: R_{95P} es la precipitación total anual de los días muy húmedos; R_{wj} es la precipitación de días húmedos en el año j ; P_{95R} es el 95 percentil de precipitación de los días húmedos; n_w es el número de días húmedos en el año j .

R99p - Precipitación total de días extremadamente húmedos: corresponde a la precipitación total anual de días húmedos cuya lámina de precipitación es mayor que el 99 percentil de precipitación de días húmedos. Entiéndase por día húmedo aquel cuya lámina de precipitación diaria sea mayor o igual a 1 mm, $R_{ij} \geq 1 \text{ mm}$.

$$R_{99P} = \sum_{i=1}^{n_w} R_{wj} \quad \text{where} \quad R_{wj} > P_{99R} \quad \text{Ec. 6-29}$$

Donde: R_{99P} es la precipitación total anual de los días extremadamente húmedos; R_{wj} es la precipitación de días húmedos en el año j ; P_{99R} percentil de precipitación de los días húmedos; n_w es el número de días húmedos en el año j .

Rtot - Precipitación total anual: corresponde a la precipitación total anual en mm.

$$R_{Tot} = \sum_{i=1}^{n_j} R_{ij} \quad \text{Ec. 6-30}$$

Donde: R_{Tot} es la precipitación anual total; R_{ij} es la cantidad de precipitación del día i en el año j ; n_j es el número de días en el año j .

6.2.2. Detección de tendencias climáticas

La dinámica global del clima ha sufrido modificaciones en los recientes años debido al auge de actividades de desarrollo económico e industrial (sección 6.1.2). Estas alteraciones han modificado los regímenes de variables climáticas tales como precipitación, temperatura, humedad, entre otras. Sin embargo, el desarrollo científico sobre cambio climático se ha planteado el reto de generar escenarios de cambio climático (Piniewski et al., 2014), o bien, analizar y predecir la tendencia de alguna variable hidrológica (Toride et al., 2018).

El análisis de tendencias es comúnmente empleado para detectar la estacionalidad y/o áreas vulnerables al cambio climático y, de esta forma, desarrollar e implementar planes estratégicos de mitigación y/o adaptación (Khanal et al., 2018; Hanski et al., 2018; Le Cornu et al., 2018). Estos estudios dependen de la naturaleza del fenómeno a modelar, la escala temporal del análisis y la calidad de las series de datos empleados. La mayoría de los métodos existentes tienen fundamento estadístico paramétrico o no paramétrico y permiten caracterizar el comportamiento general de las variables analizadas.

Tendencia Theil-Sen

Cuando el fenómeno estudiado varía de forma presuntamente lineal, el ajuste de toda recta a los datos observados será de la forma:

$$y = \alpha + \beta x \quad \text{Ec. 6-31}$$

Donde: y es valor predicho; α es la ordenada al origen; β es la pendiente y x los valores observados.

La forma más sencilla de ajustar los datos es por medio de una regresión lineal. Sin embargo, existen diversos fenómenos naturales que presentan variaciones regionales y/o globales que incrementan el error de las regresiones lineales. Henri Theil (1950) propuso una variante de las regresiones polinomiales lineales tal que los residuales de una recta ajustada a una pendiente fueran igual a 0.

$$\tau(x, r(\beta)) = 0 \quad \text{Ec. 6-32}$$

Donde: τ es una alternativa al coeficiente de correlación basada en el rango de los datos y es conocida como la tau de Kendall; $r(\beta)$ son los residuales de alguna línea ajustada a la pendiente β y x son los valores observados.

Posteriormente, Pranab Kumar Sen (1968) ajustó los intervalos de confianza y estableció que la pendiente que satisface la Ec. 6-32 es:

$$m_{T-S} = \tilde{x} \left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right) \quad \forall j \neq i \quad \text{Ec. 6-33}$$

Donde: m_{T-S} es la pendiente de Theil-Sen; \tilde{x} es la mediana de todos los pares ordenados no repetidos $P_n(x_i, y_i)$ y $P_{n+1}(x_j, y_j)$.

La pendiente Theil-Sen es un estimador altamente eficiente comparado con la regresión lineal cuando los errores son Gaussianos. Al estar compuesta por la mediana de las pendientes de todos los pares ordenados no repetidos, reduce el efecto producido por valores extremos anormales o *outliers* (Therneau y Clinic, 2018). Este estimador ha sido empleado en una diversidad de estudios hidrológicos donde el fenómeno observado tiene una variación temporal lineal (Eymen y Köylü, 2018).

Test de Mann-Kendall

Esta prueba no paramétrica permite conocer la significancia de las tendencias en cualquier serie temporal cuyas distribuciones de probabilidad no sean normales o lineales (Kendall, 1975). La hipótesis nula de esta prueba afirma que los datos de una serie de tiempo son independientes e idénticamente distribuidos. Por tanto, esta prueba no puede ser aplicada en series de datos con alta correlación (e.g: series de datos a escala diaria) (Toride et al., 2018).

De acuerdo con (Muñoz-Marín, 2008), la prueba Mann-Kendall se desarrolla de la forma:

- Se ordenan los datos de la muestra tal y como aparecen en la serie temporal (x_1, x_2, \dots, x_n) .
- Se determina el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes $(x_j - x_i)$ con $j > i$ de acuerdo a:

$$\text{Signo}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \forall (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \forall (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \forall (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 6-34}$$

- Se estima el estadístico S de la forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Signo}(x_j - x_i) \quad \text{Ec. 6-35}$$

- Se estima la varianza de S :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g t_q(t_q-1)(2t_q+5) \right] \quad \text{Ec. 6-36}$$

Donde: $\text{Var}(S)$ es la varianza de Mann-Kendall; n es el número de datos; g es el número de grupos con datos repetidos y t_q es el número de observaciones en el grupo q . Por ejemplo, en la serie temporal $\{23, 24, 29, 6, 29, 24, 24, 29, 23\}$ se tienen $g=3$ grupos de datos repetidos $[23, 24 \text{ y } 29]$; $t_1=2$ para $g=23$; $t_2=3$ para $g=24$ y $t_3=3$ para $g=29$.

- Estimar el estadístico de Mann-Kendall Z_{MK} de la forma:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \forall S > 0 \\ 0 & \forall S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \forall S < 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 6-37}$$

- Aceptar H_0 si $Z_{MK} < Z_{1-\alpha}$, rechazar en caso contrario.

6.3. Evaluación del cambio climático en México

En México se han realizado diversos estudios para medir y evaluar los efectos del cambio climático. Hay evidencia de afectaciones en la eutrofización de la parte norte del Golfo de México (Laurent et al., 2018), modificaciones en la dinámica de sus corrientes de viento (Appendini et al., 2018), efectos en la cobertura forestal (Gao et al., 2018) entre otros. Así mismo, se han desarrollado modelos de predicción climática en el río Bravo (Paredes-Tavares, et al., 2018). Uno de los impactos más importantes que tiene el cambio climático en México es el decaimiento de la producción en el sector agrario (Monterroso-Rivas et al., 2018). Se ha

demostrado que existen impactos potenciales en la producción de caña de azúcar nacional (Baez-González et al., 2018) y en la producción de maíz y seguridad alimentaria (Murray-Tortarolo, Jaramillo y Larsen, 2018). Debido a que es un problema de afectación multisectorial (Aburto-Oropeza et al., 2018), se requiere la participación gubernamental, social y científica (Ortega-Díaz y Casamadrid-Gutiérrez, 2018) para el desarrollo de técnicas y procedimientos para su mitigación y/o adaptación (DOF, 2012).

6.3.1. Materiales y método

La evaluación de la variación en la temperatura y precipitación, por efectos de cambio climático, se realiza por medio de los 27 ICC propuestos por el ETCCDI (2015). Estos ICC requieren datos a escala diaria, mensual y anual. Para la valoración de índices a escala diaria, se emplea las imágenes del modelo de flujo climático Daymet V3 (<https://daymet.ornl.gov/>, 2017). La información está organizada en archivos de formato NetCDF (*.nc4) y disponible para todo América del Norte en una malla con resolución de 1 km². En cuanto a los índices a escalas mensual, se emplean las imágenes de precipitación y temperatura generadas en el marco del Capítulo 5 de la presente investigación. La Tabla 6.1 muestra los detalles del conjunto de imágenes empleadas para estimar los ICC y la agrupación de estos.

6.3.2. Resultados

El análisis se realizó para todo el país donde cada píxel fue procesado como una estación climática. Esto permite obtener una serie temporal de datos para cada uno de los píxeles por cada ICC estimado (Figura 6.14). Así mismo, se estimó la pendiente Theil-Sen y su significancia con la prueba de Mann-Kendal para un nivel de confianza de 0.95. De esta forma se visualiza, de manera espacial, la intensidad del incremento o decremento del ICC estimado. Este procedimiento se realizó en Hydra-Eflow y sus resultados se describen en los párrafos siguientes.

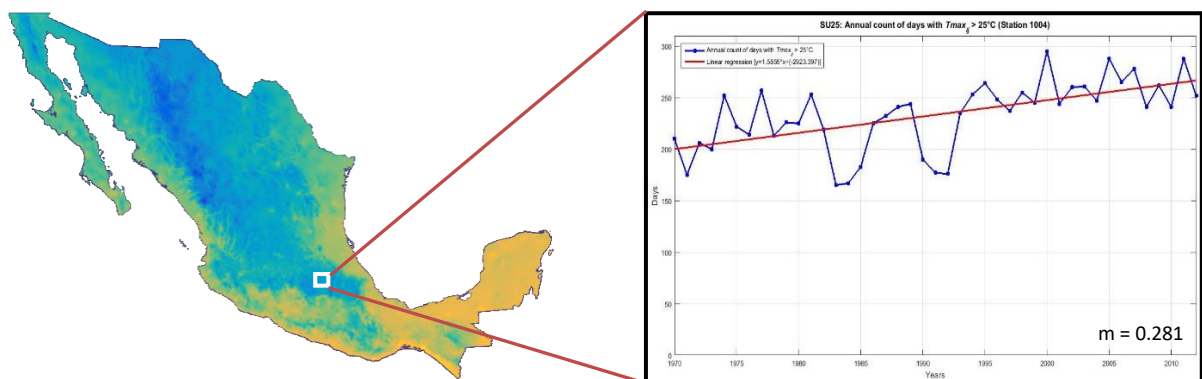


Figura 6.14 Ejemplo de serie espacio-temporal por píxel.

Tabla 6.1 Conjunto de imágenes empleadas para estimar los ICC del ETCCDI.

V	ICC	Esc. t*		Conjunto de datos empleado	Datum	Proy.	Unidad	Res. (m)
		D	M					
T mínima	F0	X		Daymet	WGS_84	CCL*	días	1000
	TR20	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
	TNx		X	Hydra-Eflow	ITRF-92	CCL	°C	250
	TNn		X	Hydra-Eflow	ITRF-92	CCL	°C	250
	CSDI	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
	TN10p	X		Daymet	WGS_84	CCL	%	1000
	TN90p	X		Daymet	WGS_84	CCL	%	1000
T máxima	SU25	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
	IDO	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
	TXx		X	Hydra-Eflow	ITRF-92	CCL	°C	250
	TXn		X	Hydra-Eflow	ITRF-92	CCL	°C	250
	WSDI	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
	TX10p	X		Daymet	WGS_84	CCL	%	1000
	TX90p	X		Daymet	WGS_84	CCL	%	1000
Tm	DTR	X		Daymet	WGS_84	CCL	°C	1000
	GSL	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
Precipitación	Rx1d	X		Daymet	WGS_84	CCL	mm	1000
	Rx5d	X		Daymet	WGS_84	CCL	mm	1000
	SDII	X		Daymet	WGS_84	CCL	mm/día	1000
	R10		X	SAMPO	ITRF-92	CCL	días	1000
	R20		X	SAMPO	ITRF-92	CCL	días	1000
	Rnn		X	SAMPO	ITRF-92	CCL	días	1000
	R95p	X		Daymet	WGS_84	CCL	%	1000
	R99p	X		Daymet	WGS_84	CCL	%	1000
	Rtot		X	SAMPO	ITRF-92	CCL	mm/año	1000
	CWD	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000
S	CDD	X		Daymet	WGS_84	CCL	días	1000

Donde: Ecs. t – escala temporal; D – día; M – mes; S – sequía y CCL – Cónica Conforme de Lambert.

Temperatura mínima

Los resultados revelan que el número de días fríos (F0), en general, se han reducido en la parte norte del país. Su distribución espacial se ha modificado ligeramente, desplazándose del estado de Chihuahua al estado de Sonora y Baja California Norte. Este fenómeno tiene tendencias de incremento en Sonora y norte de Chihuahua. Sin embargo, se observa una tendencia a disminuir en el sur de Chihuahua en colindancia con el estado de Sinaloa. Un contraste revelado se presenta para la parte centro del país y en el estado de Jalisco, donde el F0 se ha incrementado en los últimos años y muestra tendencias de incremento poco notable.

Por otro lado, el número de noches tropicales (TR20) ha disminuido en ambas costas de la nación haciéndolas más cálidas con el pasar del tiempo. Este fenómeno se acentúa en las costas de Guerrero, Michoacán y Tabasco, pero muestra un desfase espacial en el caso de la península de Yucatán. El análisis de tendencias revela que este fenómeno seguirá acentuándose en Guerrero, Michoacán y Tabasco. Sin embargo, la península de Yucatán muestra variaciones de incremento y decremento al mismo tiempo por lo que es probable que se desfasen las noches tropicales en esta zona.

La magnitud máxima de las temperaturas mínimas (TNx) muestran variaciones tanto en magnitud como en su distribución espacial. Estas variaciones tienen un efecto de desfase en los estados de Chihuahua, Tamaulipas, Guerrero y Yucatán. Las tendencias muestran áreas de decremento en la colindancia entre Sonora y Chihuahua y a su vez se incrementa en la zona norte de ambos estados. Otra zona que muestra variaciones es la costa del pacífico mexicano. Los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas tienen tendencias de desfase y cambio en las magnitudes de las máximas temperaturas mínimas. Estos resultados son consistentes con el porcentaje de días de máximas temperaturas mínimas (TN90p) y el F0.

La duración de las ondas de frío (CSDI) muestran una reducción general en el país, pero su distribución se ha extendido en el estado de Sonora y alcanza al estado de Jalisco y el centro del país. Las pendientes de Theil-Sen indican que el fenómeno se acentuará en la región norte, el bajío y el centro de México.

Temperatura máxima

La disminución de F0 implica un incremento en el número de días cálidos (SU25), mismos que se han incrementado, de manera general, en todo México. Este fenómeno muestra tendencias de seguir aumentando en los estados de Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí, Querétaro, Sonora, Chihuahua, Oaxaca, Chiapas y la colindancia entre Nuevo León y Tamaulipas. Sin embargo, se cuenta con una pequeña cantidad de días gélidos (IDO) en Veracruz.

La magnitud máxima de la temperatura máxima (TXx) se ha incrementado en toda la república mexicana. El análisis de tendencias de Theil-Sen muestra tendencias que este fenómeno seguirá agudizándose. En consecuencia, se muestra una menguación de las mínimas temperaturas máximas (TXn) que seguirán disminuyendo en los estados de Chihuahua, Nuevo León, Guerrero, Estado de México, Veracruz, Tabasco, Chiapas y la península de Yucatán. El incremento en TXx también se ve reflejado en el porcentaje de días con altas temperaturas (TX90p), mismo que presenta la misma dinámica espacial.

Por otro lado, la duración de las ondas de calor (WSDI) se ha incrementado en los estados de Sonora, Nuevo León, Sinaloa, Colima, Jalisco, Guerrero, Chiapas, Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y la península de Yucatán. Así mismo, tienen tendencia a incrementarse en los estados de Aguascalientes, Guanajuato, San Luis Potosí y Querétaro.

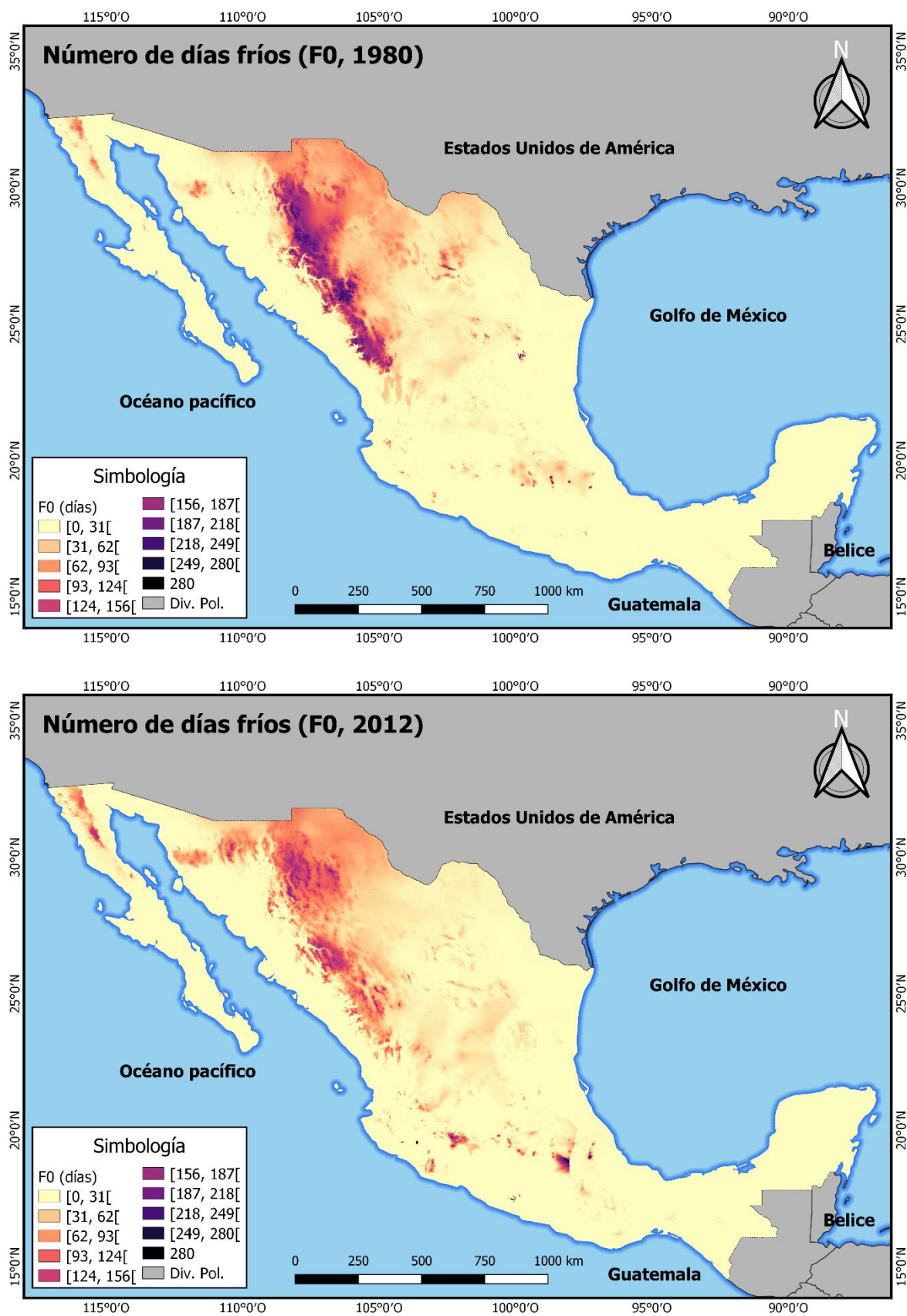


Figura 6.15 Número de días fríos (F0) para los años 1980 y 2012.

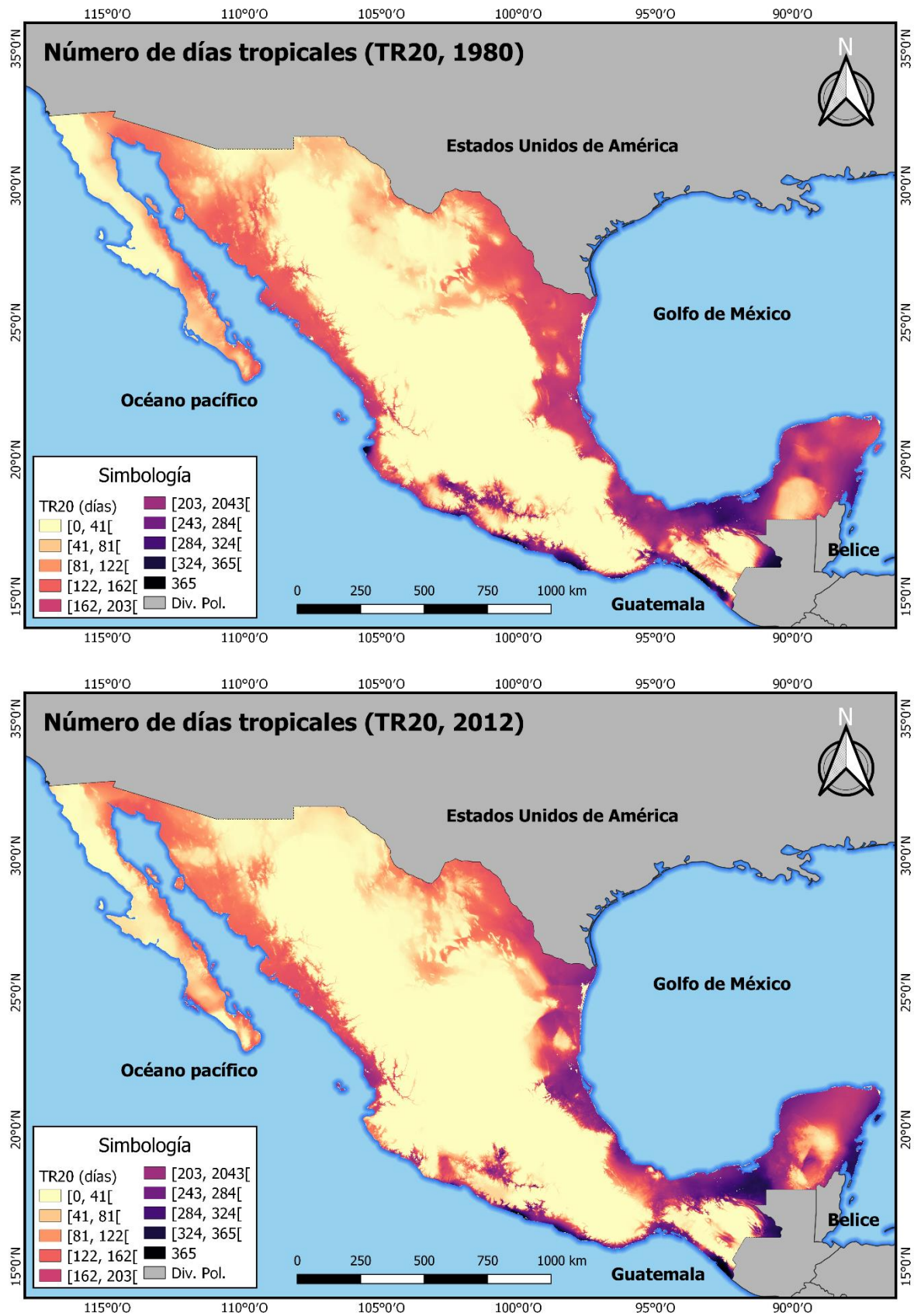


Figura 6.16 Número de días tropicales (TR20) para los años 1980 y 2012.

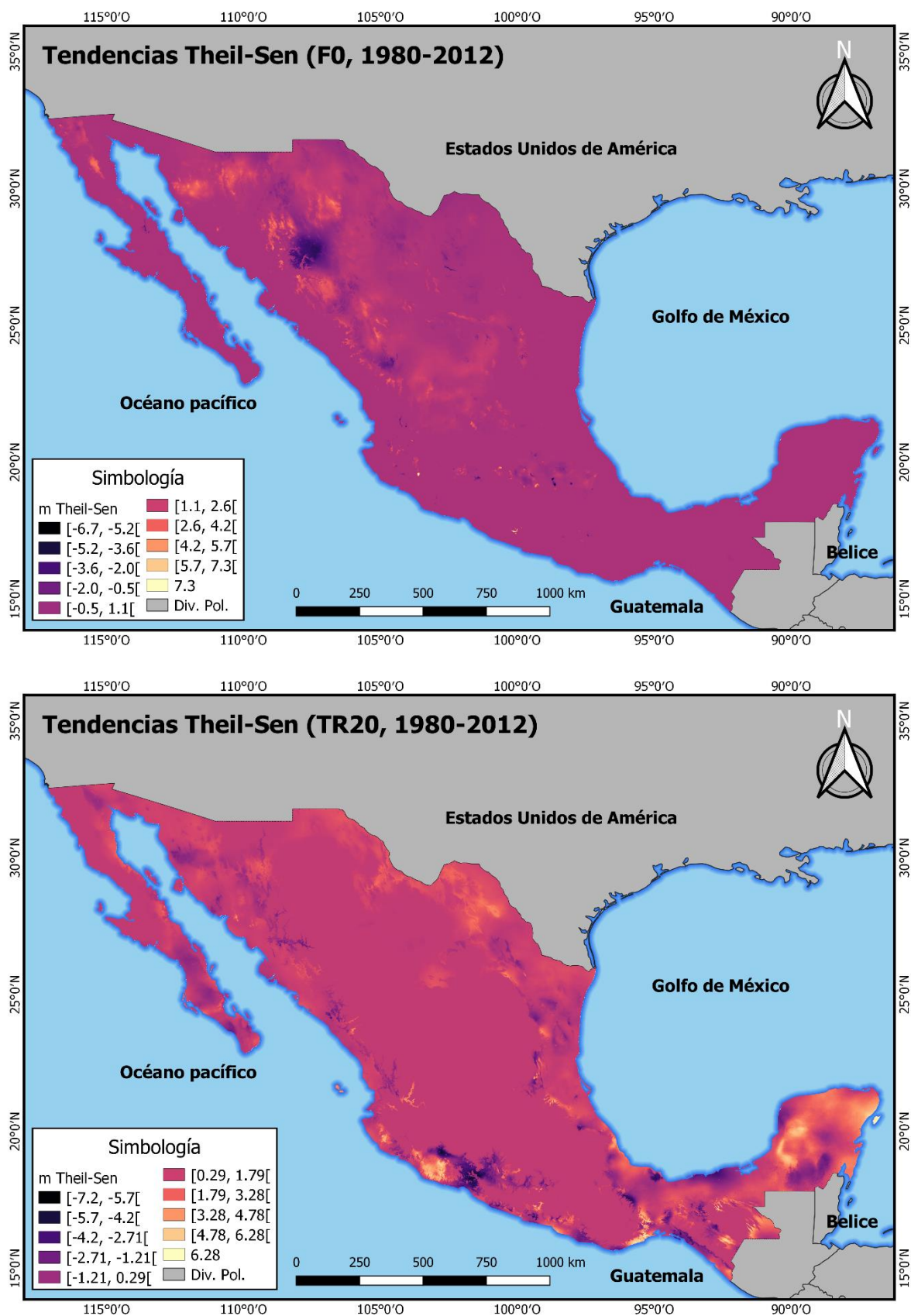


Figura 6.17 Tendencias Theil-Sen para no. de días fríos (F0) y tropicales (TR20) periodo 1980-2012.

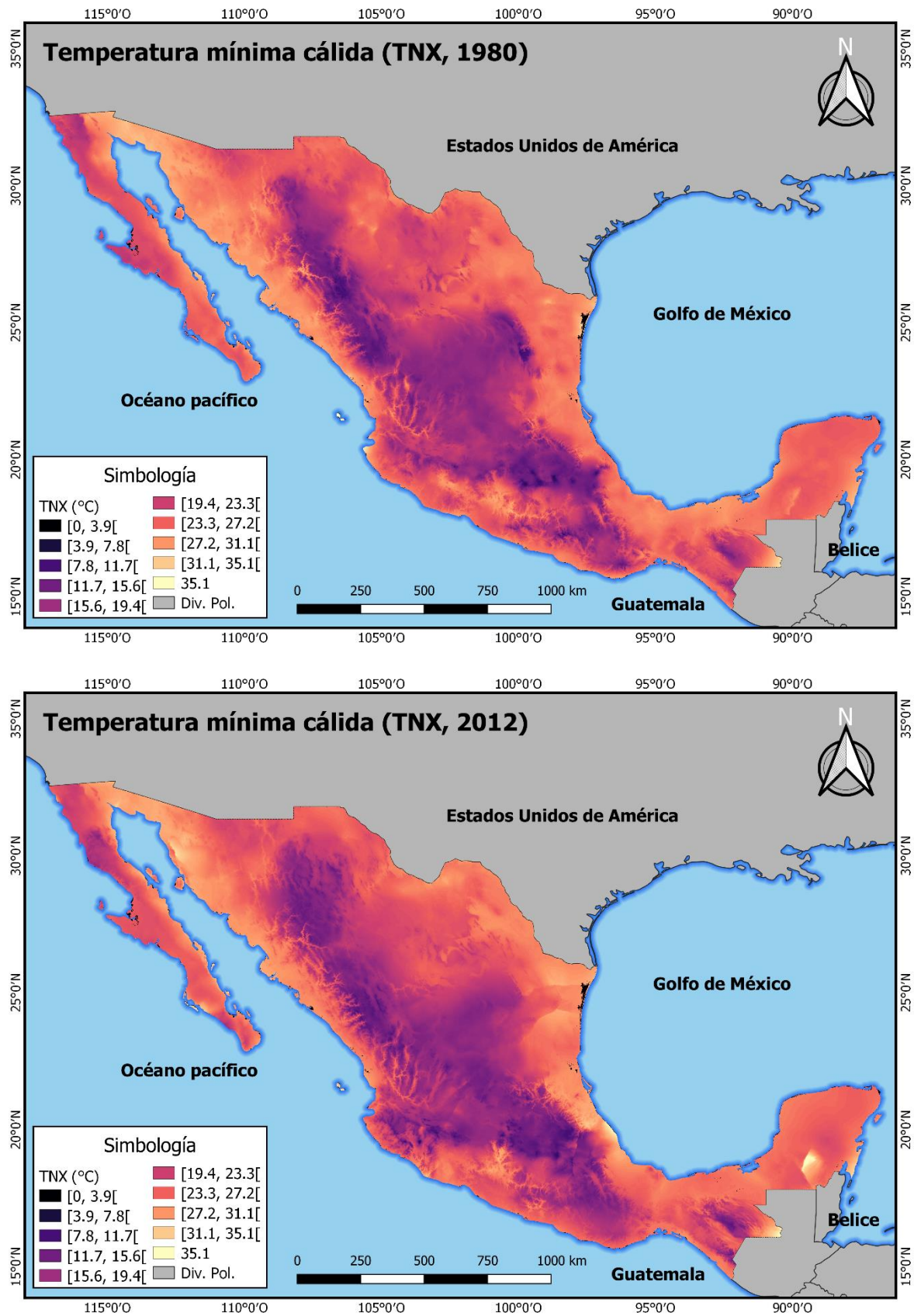


Figura 6.18 Temperatura máxima cálida (TNX) para los años 1980 y 2012.

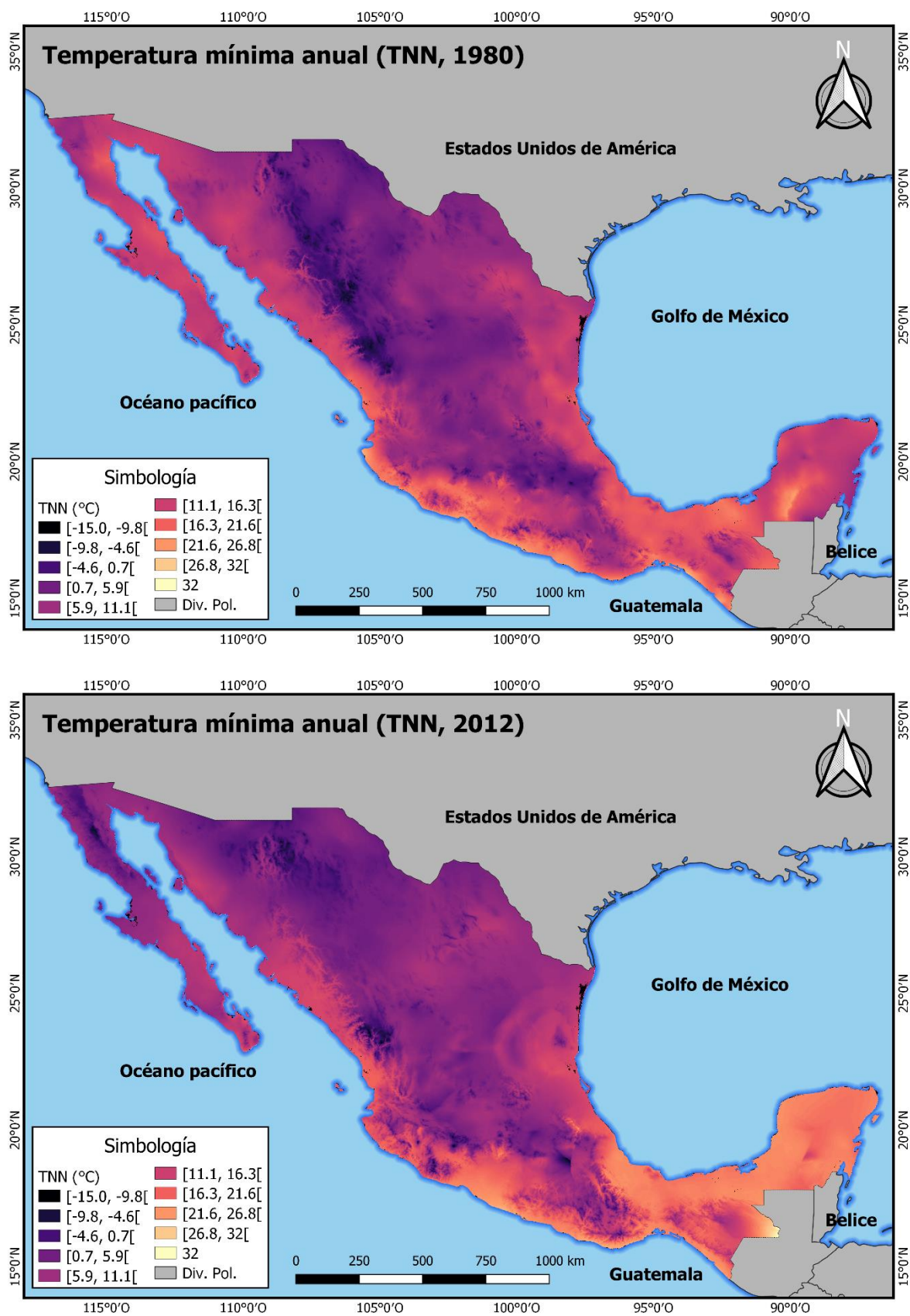


Figura 6.19 Temperatura mínima anual (TNN) para los años 1980 y 2012.

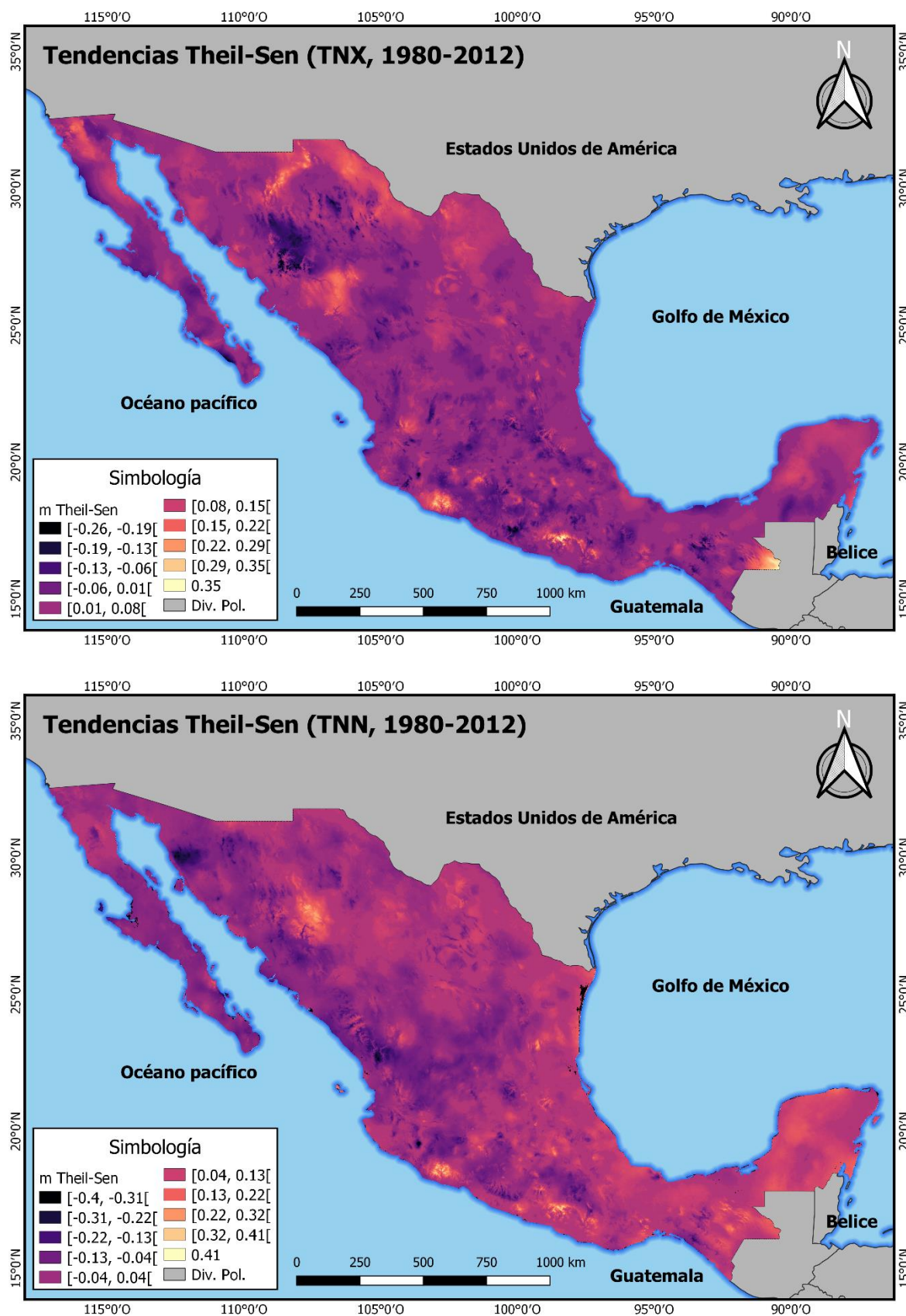


Figura 6.20 Tendencias Theil-Sen para $T_{mín}$ cálida (TNX) y $T_{mín}$ anual (TNN) periodo 1980-2012.

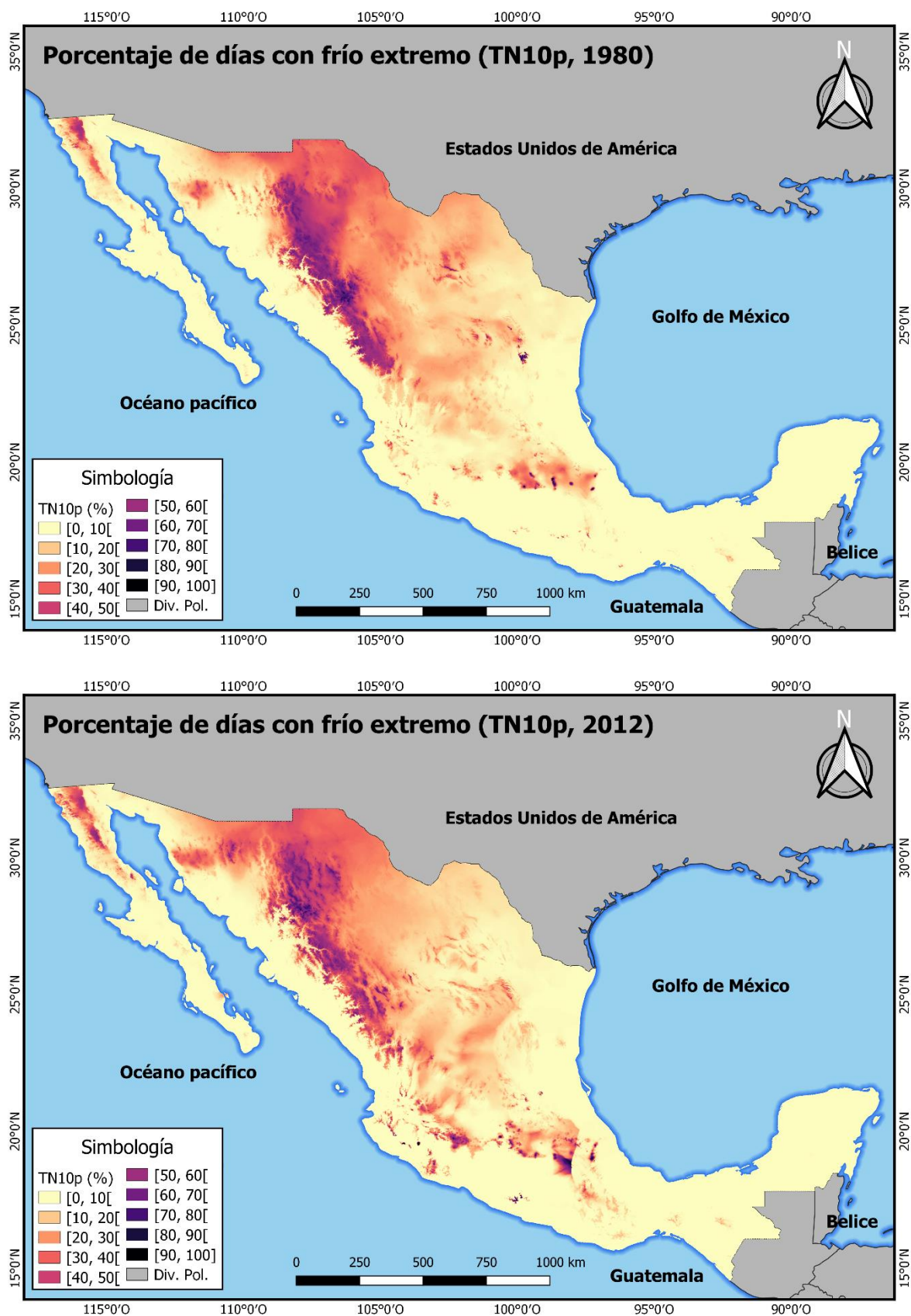


Figura 6.21 Porcentaje de días con frío extremo (TN10p) para los años 1980 y 2012.

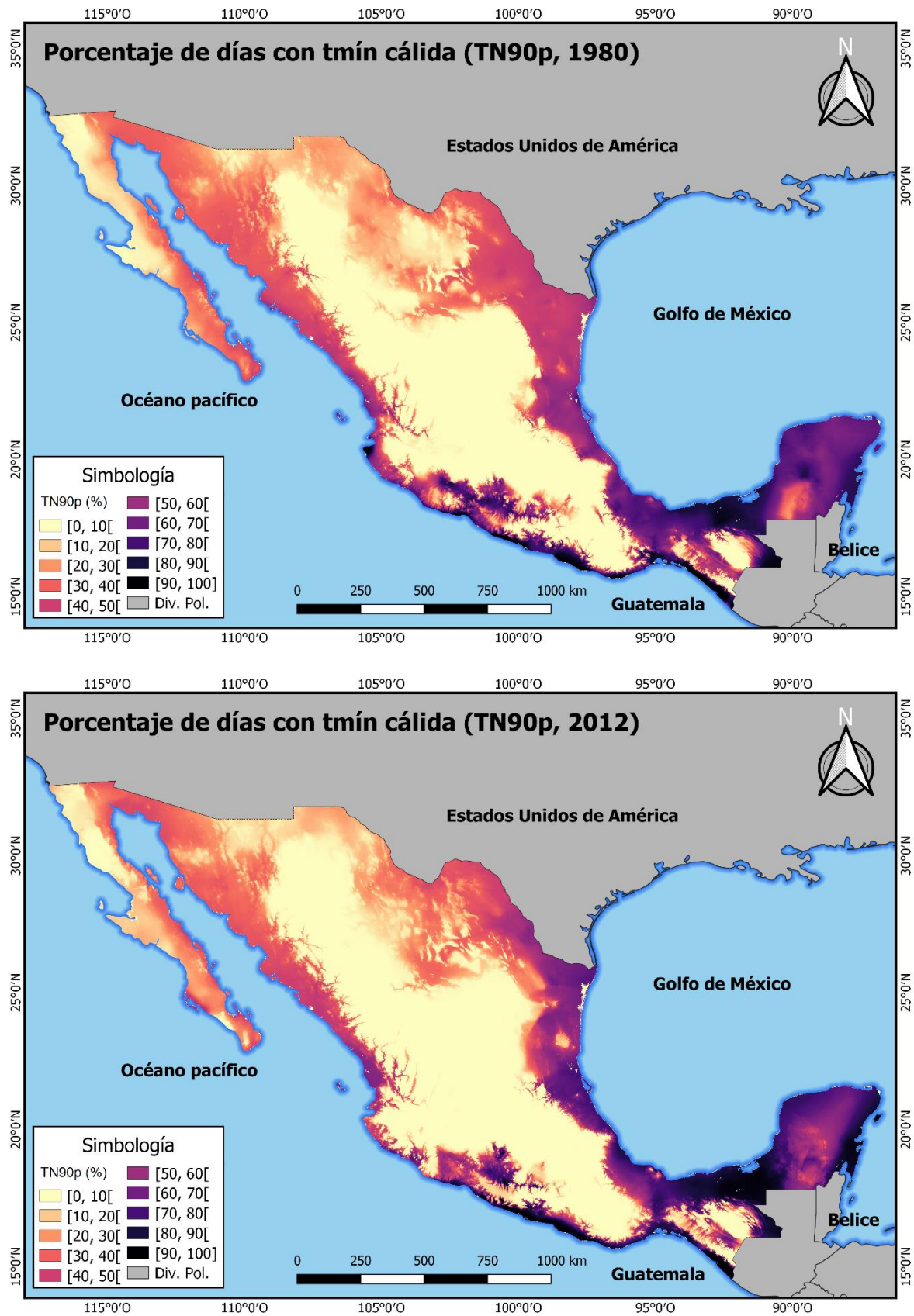


Figura 6.22 Porcentaje de días con Tmín cálida (TN90p) para los años 1980 y 2012.

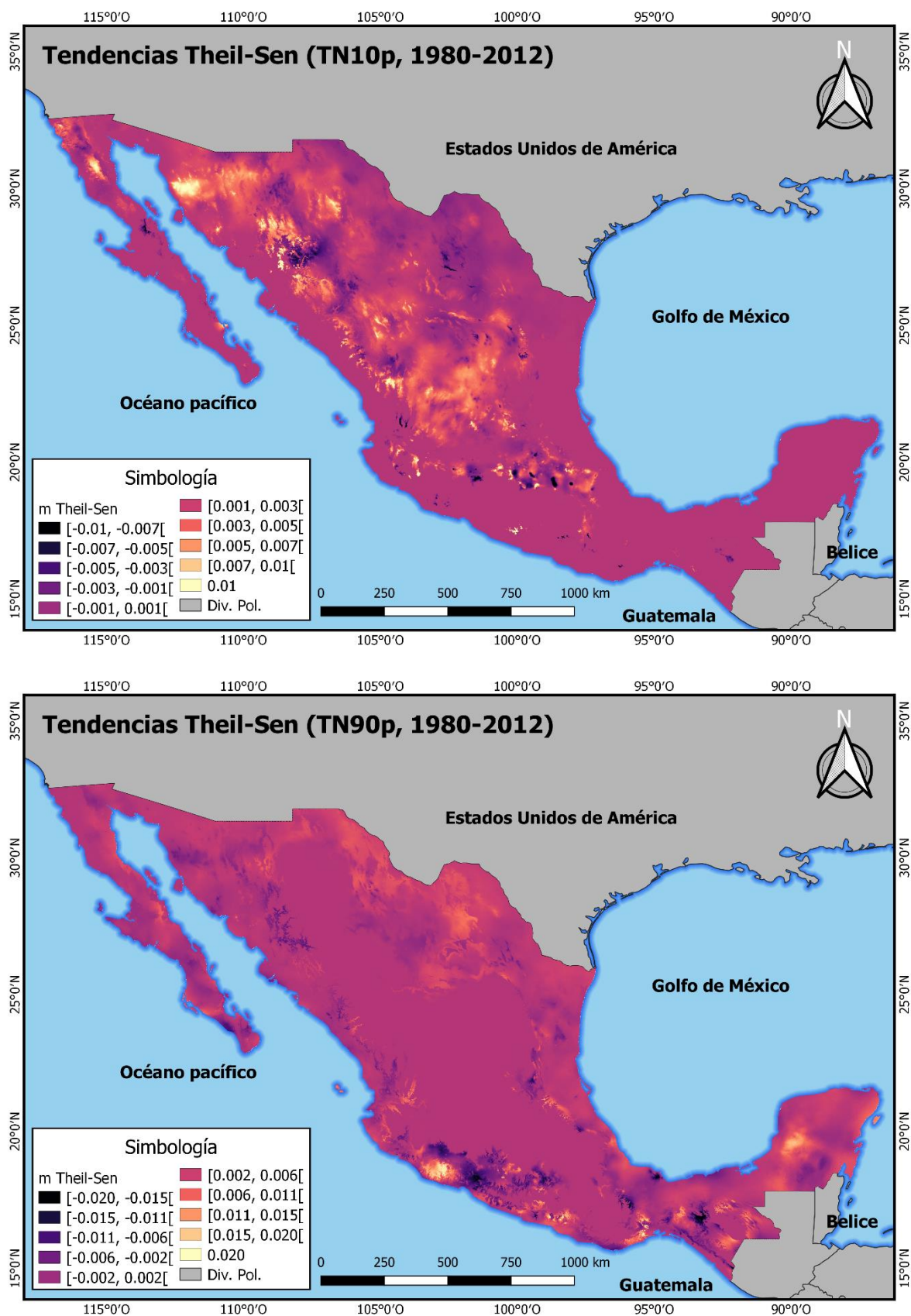


Figura 6.23 Tendencias Theil-Sen para días con frío extremo (TN10p) y Tmín cálida (TN90p) periodo 1980-2012.

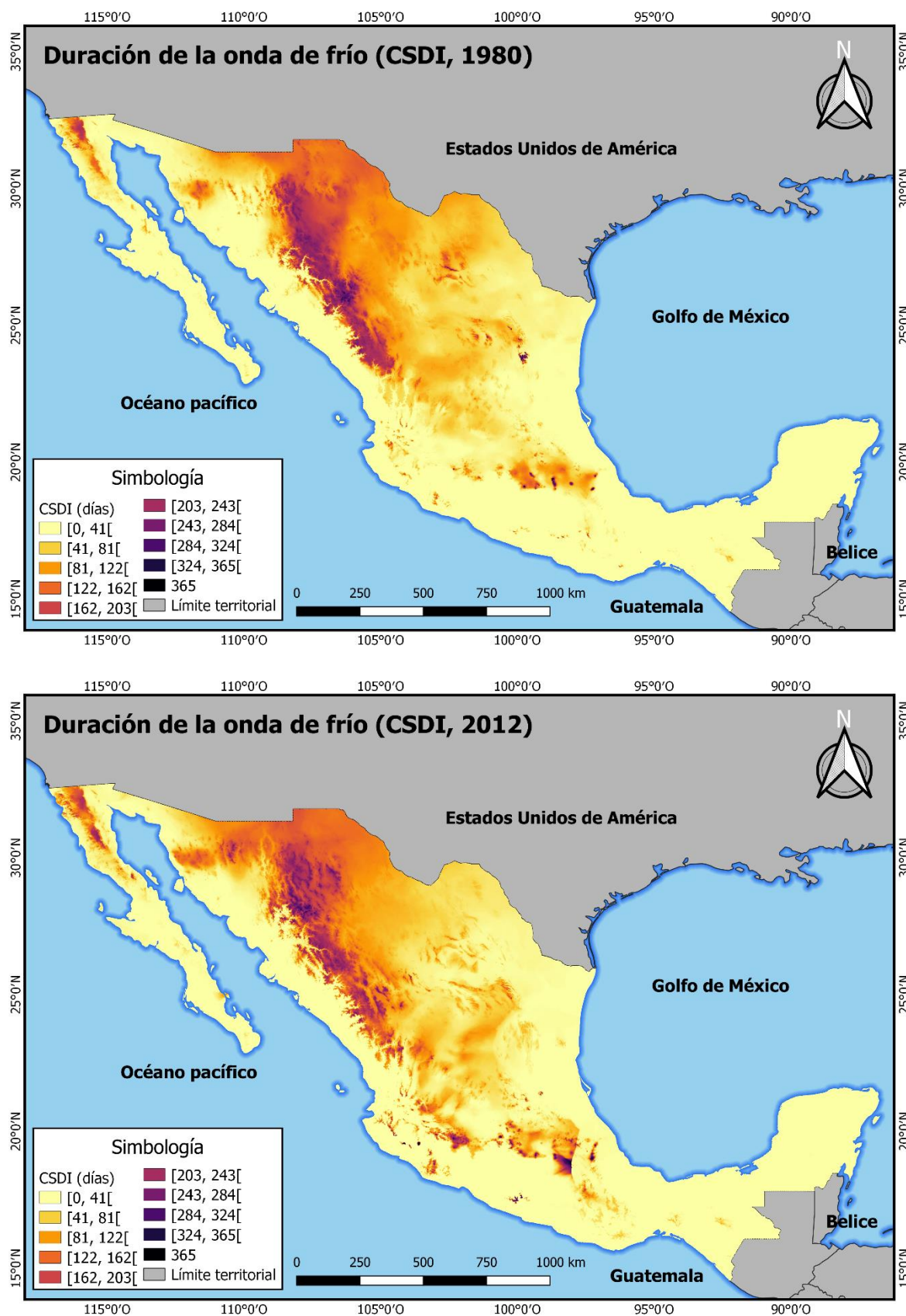


Figura 6.24 Duración de la onda de frío (CSDI) para los años 1980 y 2012.

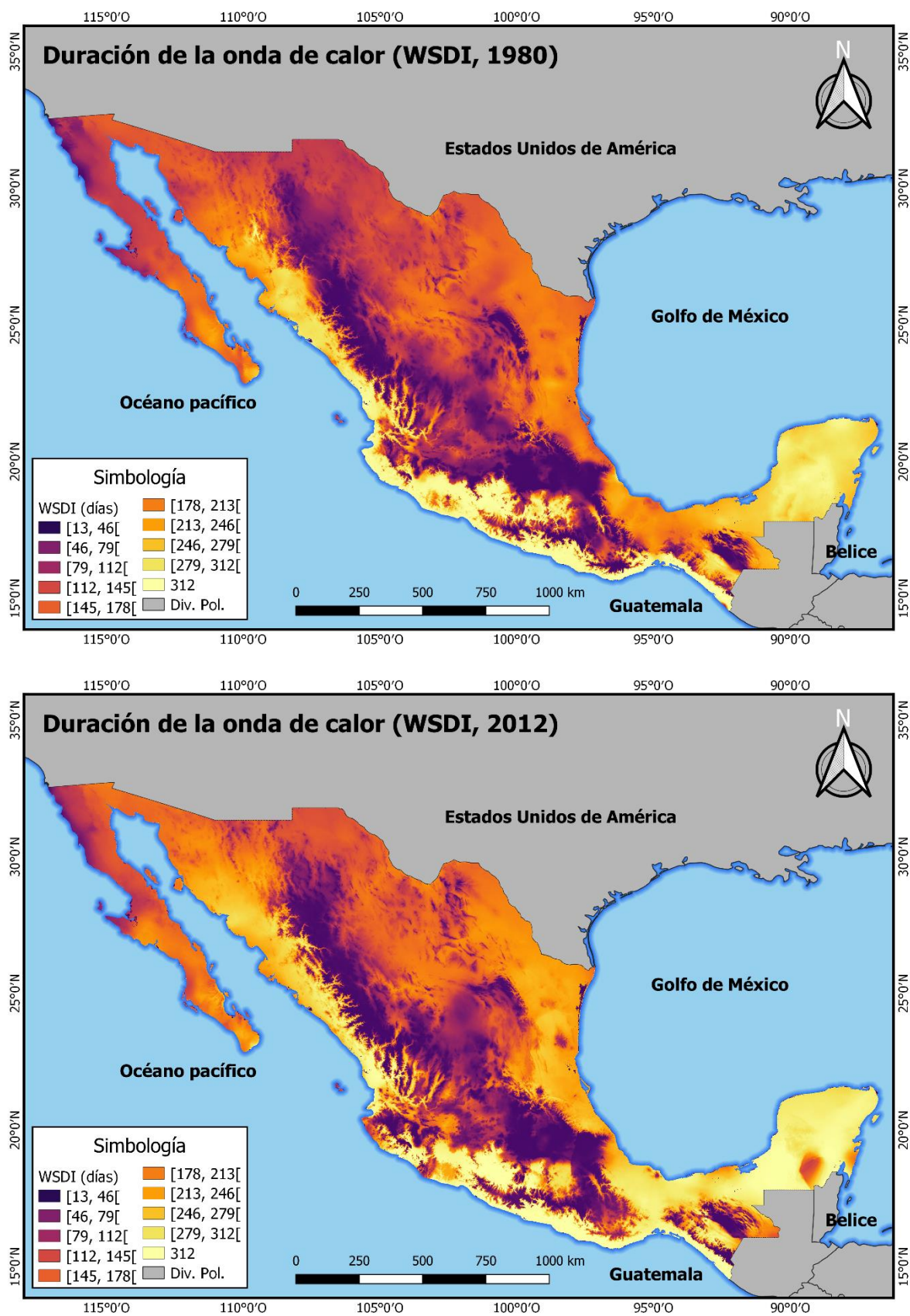


Figura 6.25 Duración de la onda de calor (WSDI) para los años 1980 y 2012.

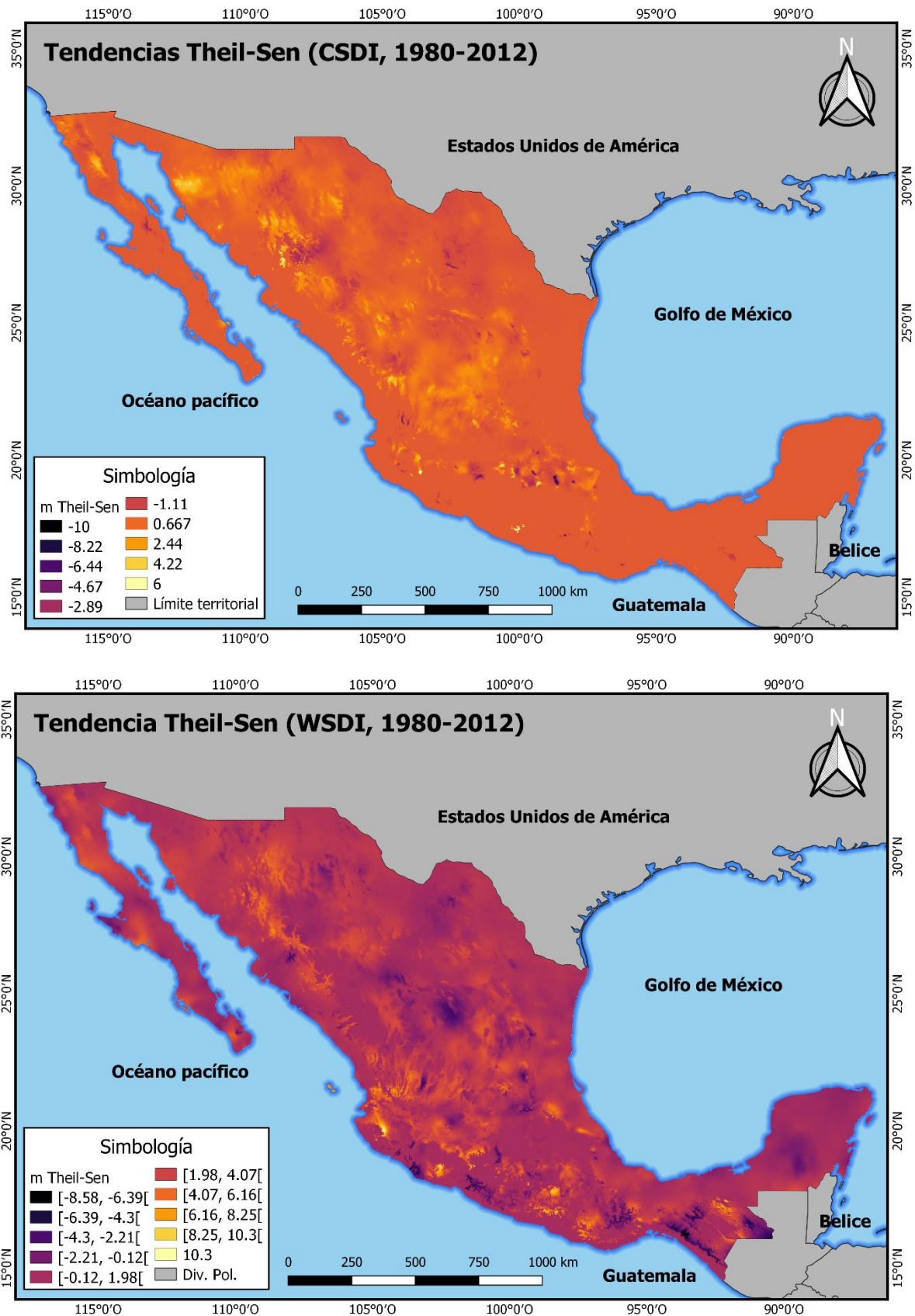


Figura 6.26 Tendencias Theil-Sen para duración de onda de frío (CSDI) y calor (WSDI) periodo 1980-2012.

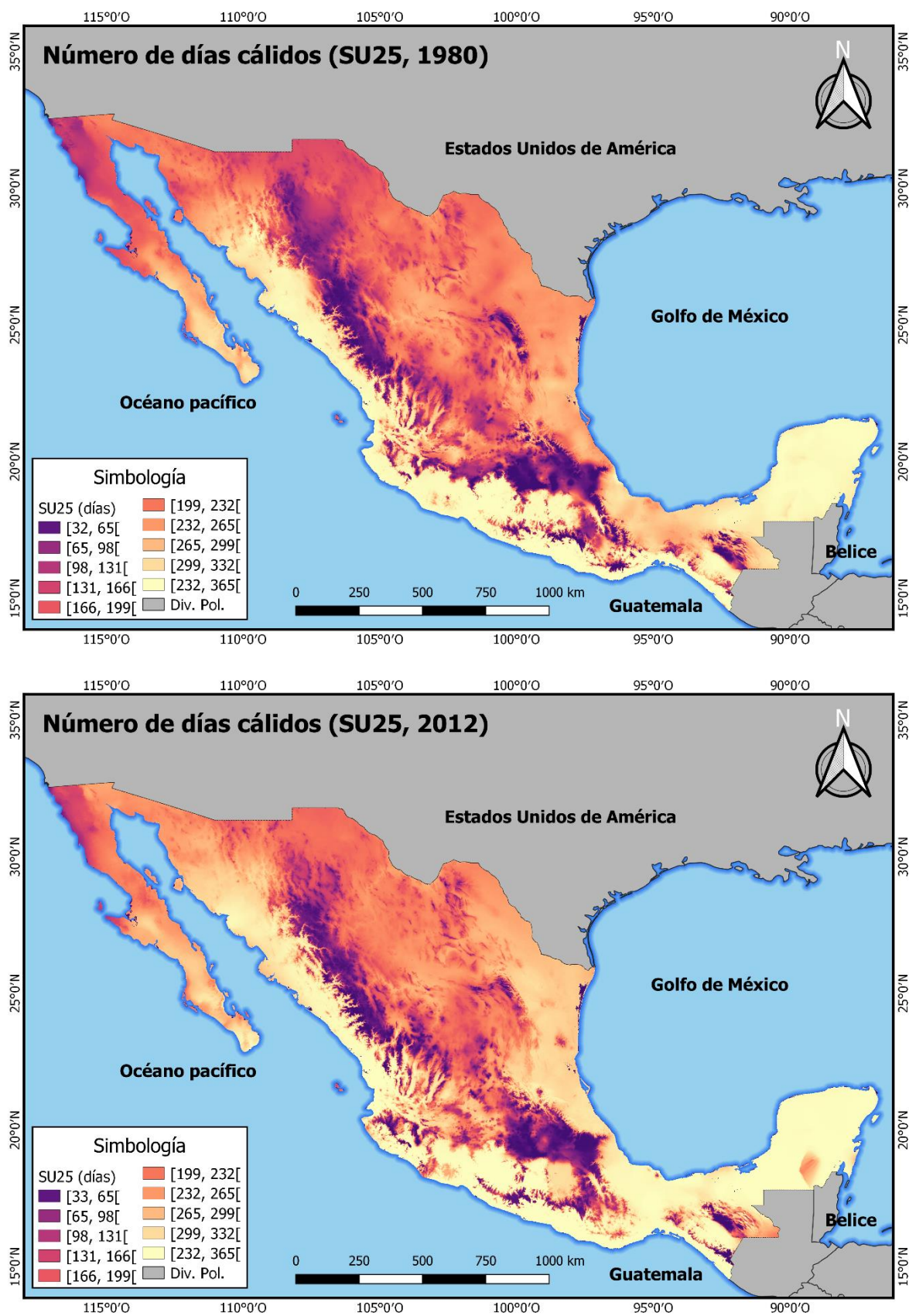


Figura 6.27 Número de días cálidos (SU25) para los años 1980 y 2012.

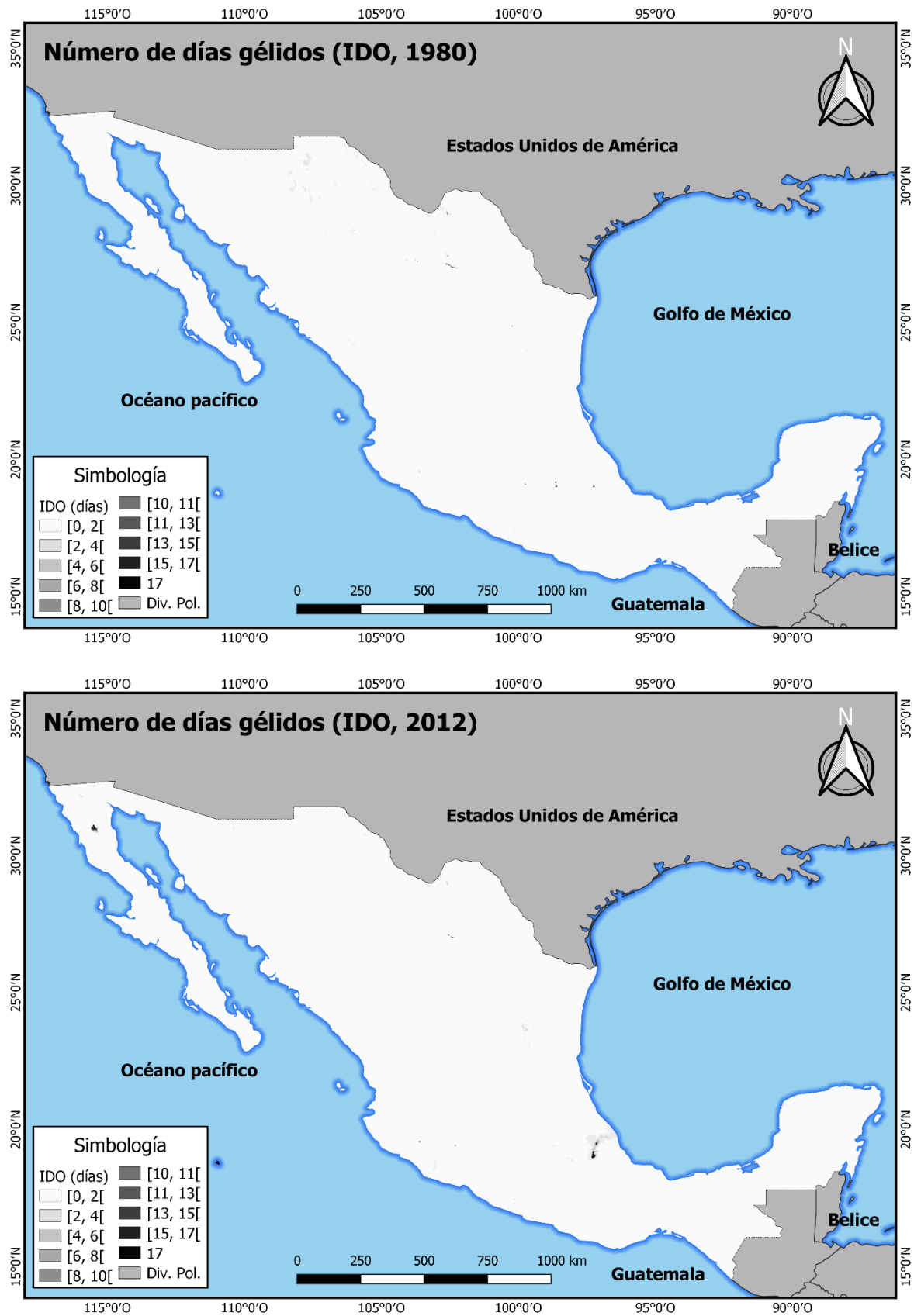


Figura 6.28 Número de días gélidos (IDO) para los años 1980 y 2012.

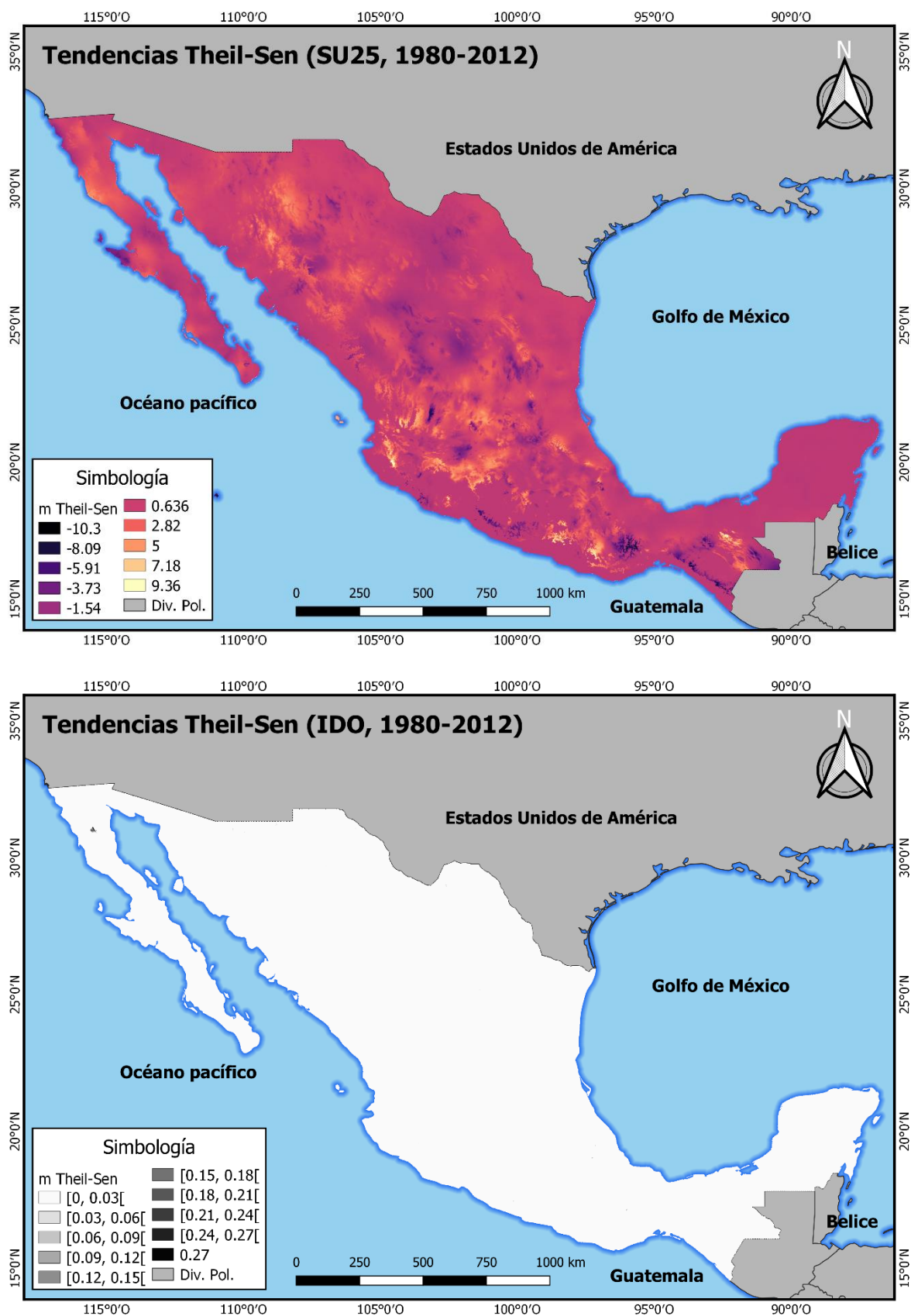


Figura 6.29 Tendencias Theil-Sen para no. de días cálidos (SU25) y gélidos (IDO) periodo 1980-2012.

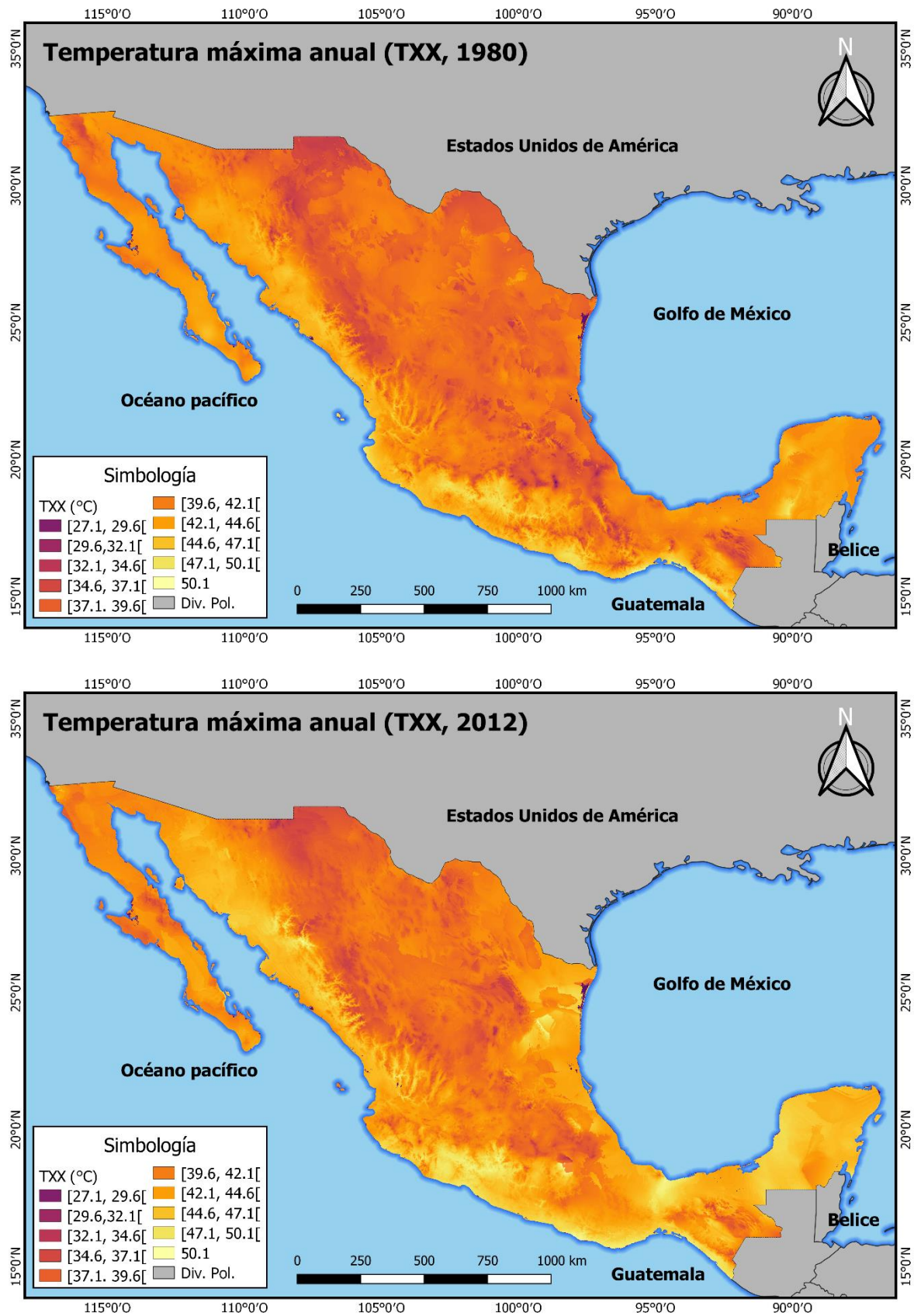


Figura 6.30 Temperatura máxima anual (TXX) para los años 1980 y 2012.

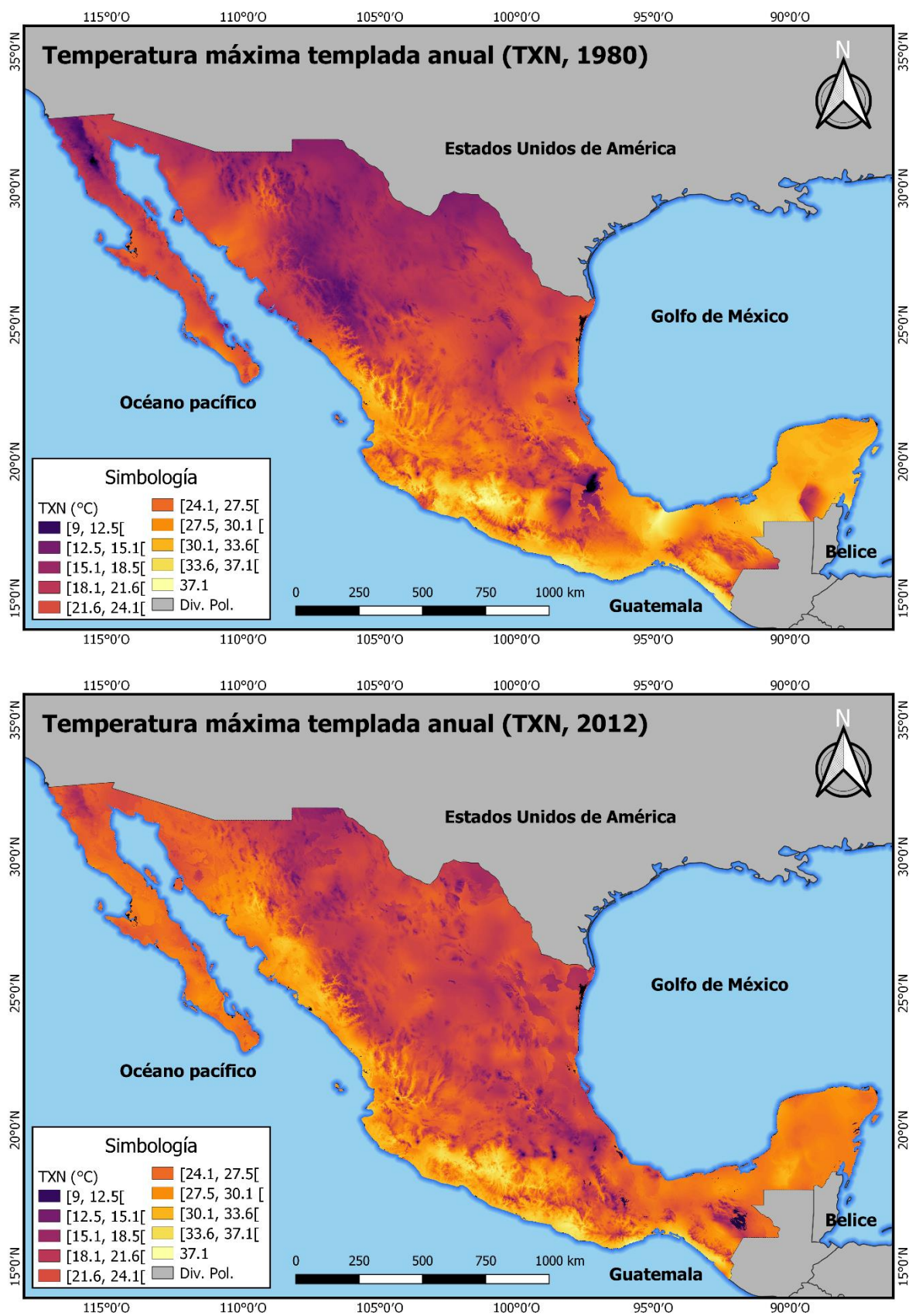


Figura 6.31 Temperatura máxima templada anual (TXN) para los años 1980 y 2012.

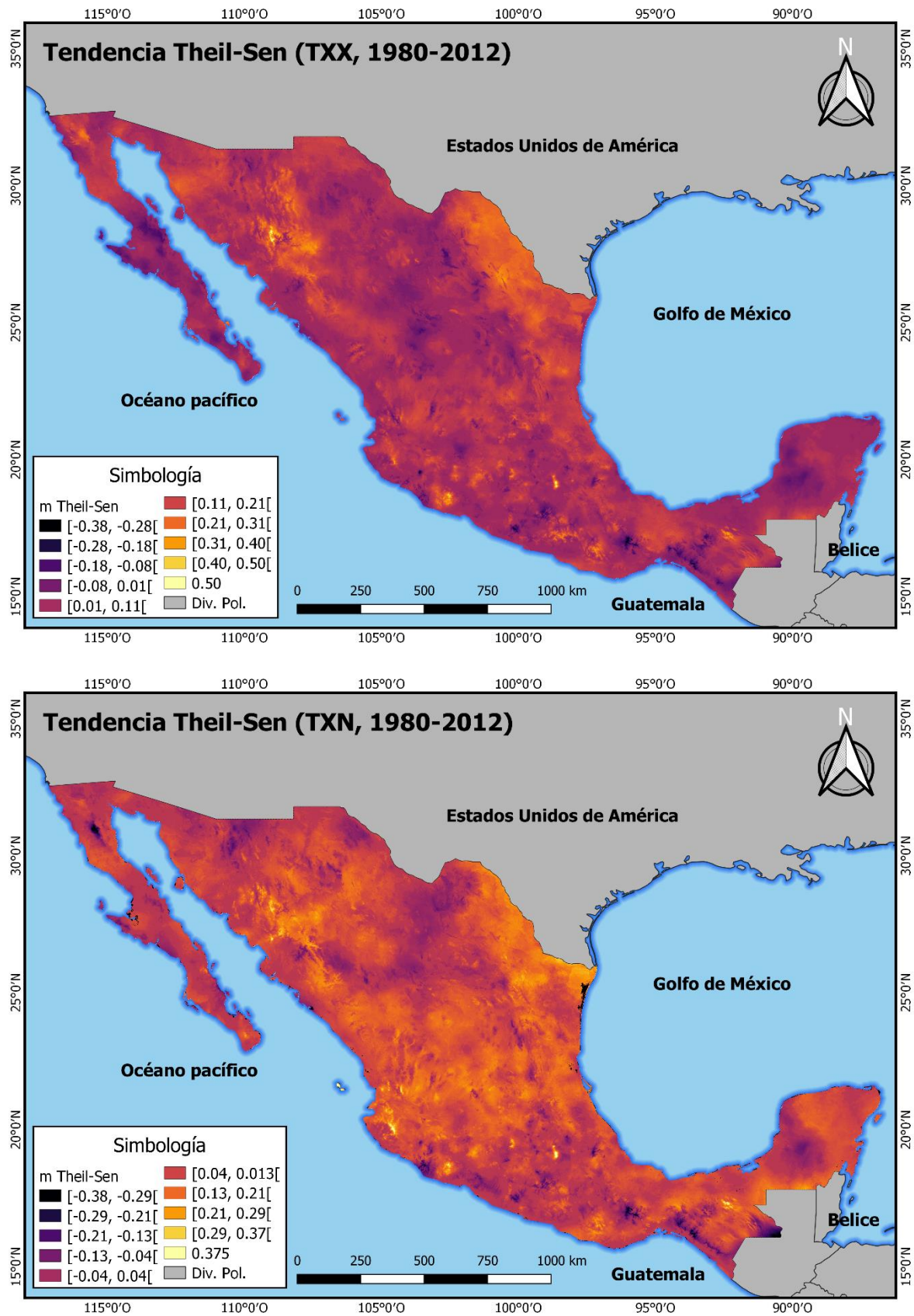


Figura 6.32 Tendencias Theil-Sen para Tmáx anual (TXN) y Tmáx cálida (TXX) periodo 1980-2012.

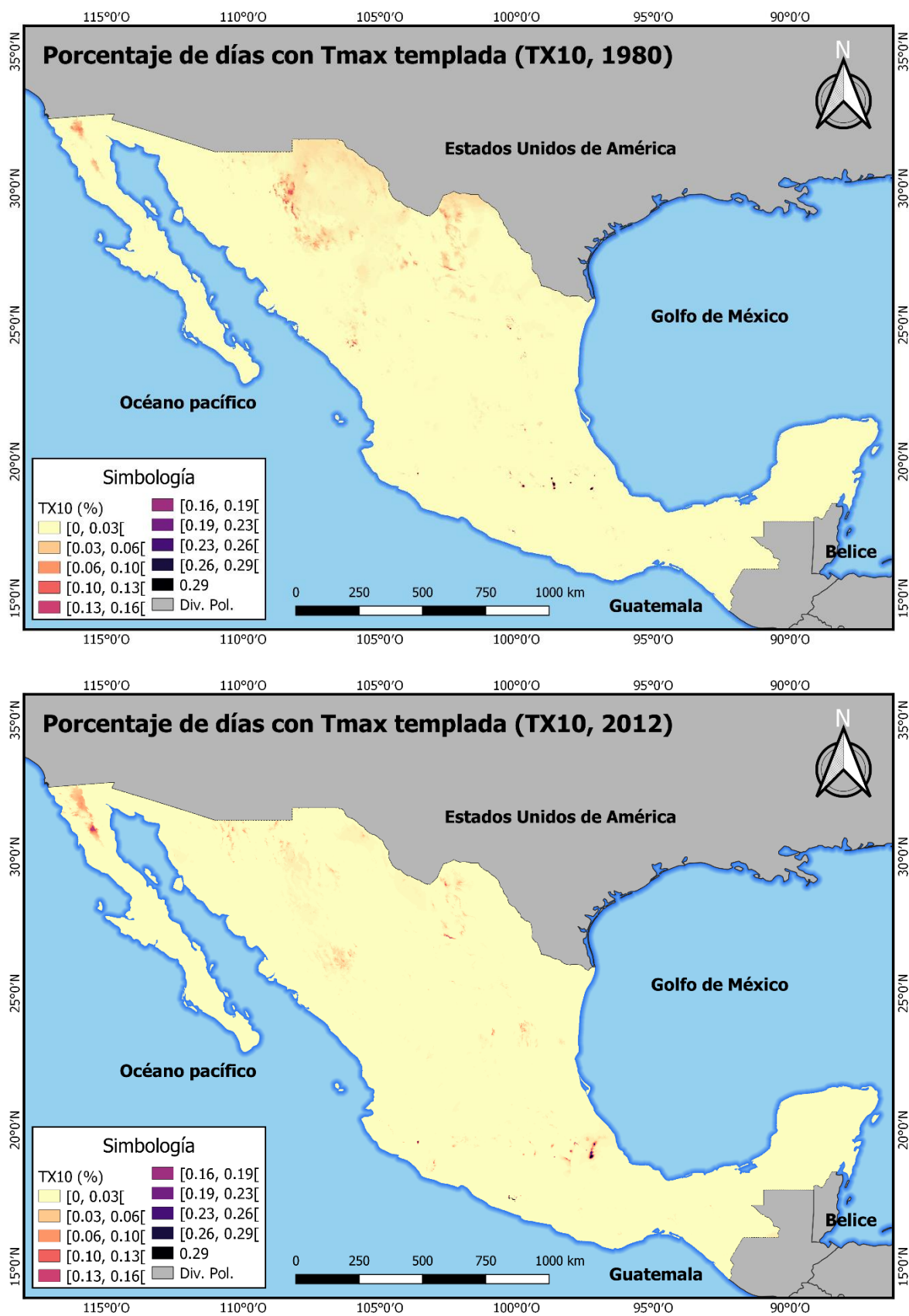


Figura 6.33 Porcentaje de días con T_{máx} templada (TX10p) para los años 1980 y 2012.

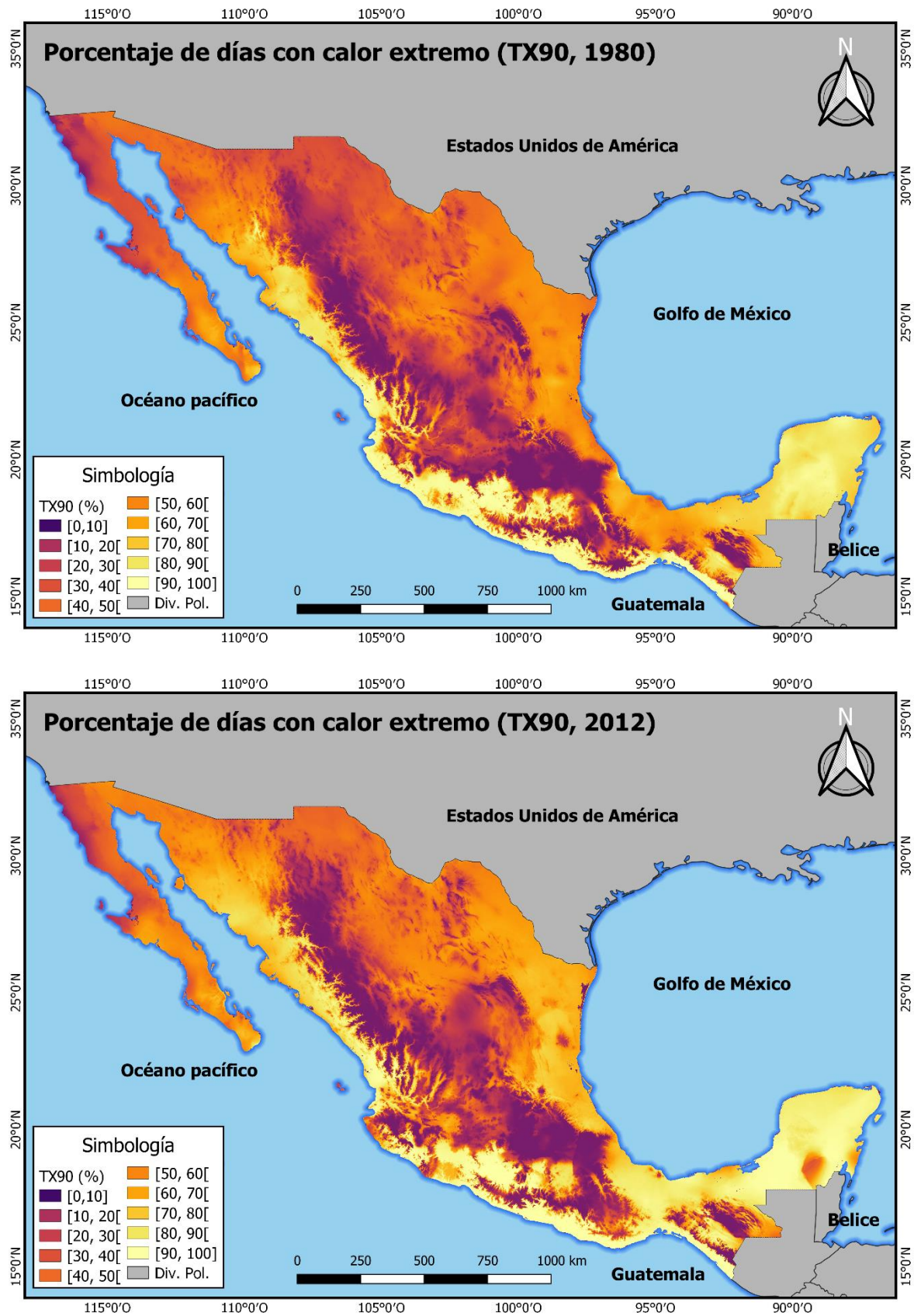


Figura 6.34 Porcentaje de días con calor extremo (TX90p) para los años 1980 y 2012.

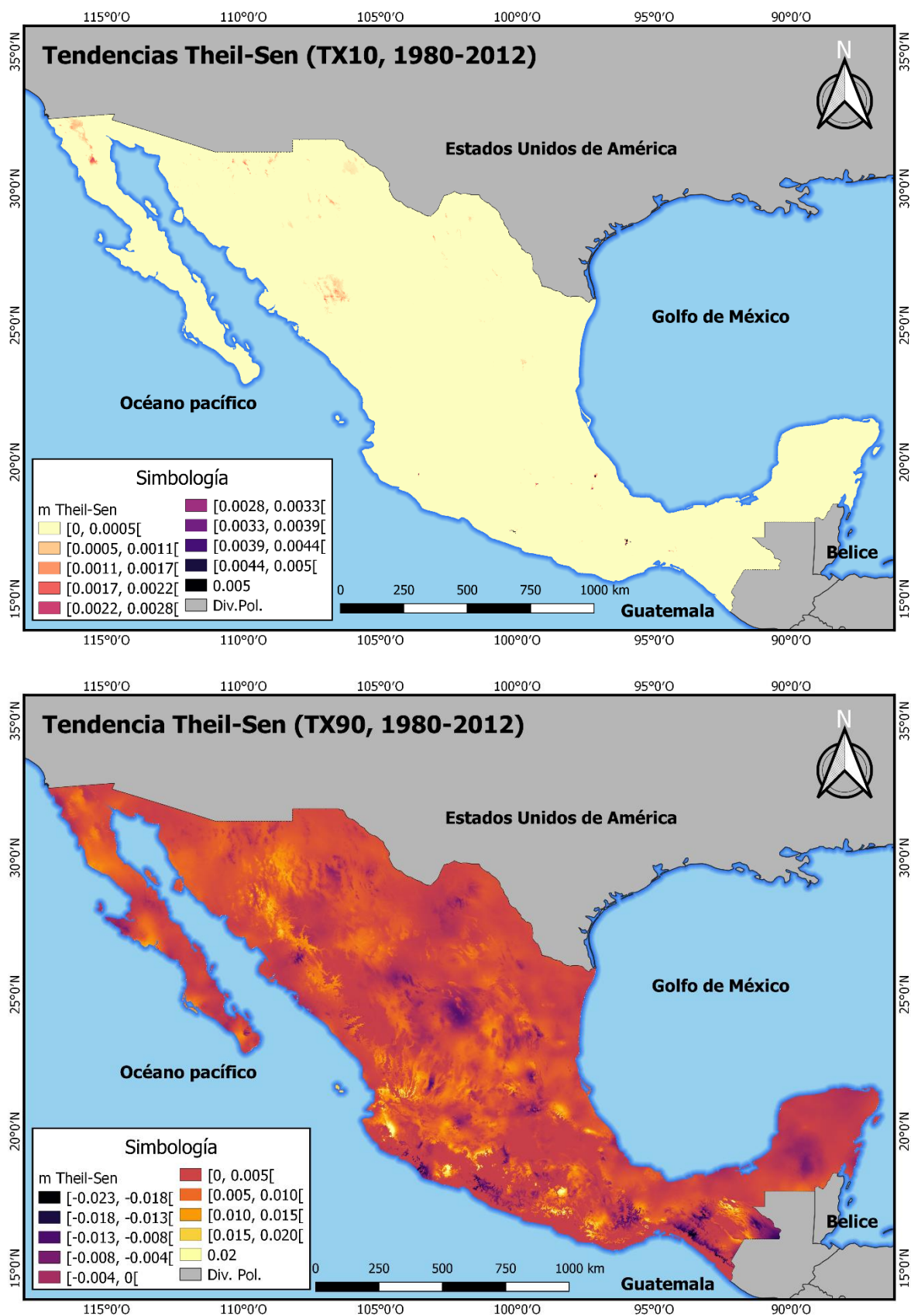


Figura 6.35 Tendencias Theil-Sen para porcentaje de días con T_{máx} templada (TX10p) y calor extremo (TX90p) periodo 1980-2012.

Temperatura media

Debido a una disminución de la temperatura mínima y un incremento de la temperatura máxima, se incrementa el rango de la isothermalidad (DTR). Este fenómeno se ha ampliado en los estados de Sonora, Chihuahua, Jalisco y la región centro de México y seguirá esta tendencia en el bajío y el centro de la república. La duración de temperaturas medias altas (GSL) también ha ido a la alza.

Precipitación

Las precipitaciones máximas diarias (RX1D, R10 y R20) y su intensidad (SDII), muestran modificaciones tanto en su magnitud como en su distribución espacial. Estas modificaciones impactan a los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Chiapas y la península de Yucatán. Por otro lado, la cantidad total de precipitación anual (Rtot) se va visto disminuida. El análisis de las pendientes de Theil-Sen muestra que este fenómeno continuará afectando principalmente los estados de Chiapas, Tabasco y la península de Yucatán. De esta forma el régimen de precipitaciones tiende a cambiar por uno con menos cantidad precipitada, pero con mayor intensidad.

Existen ICCs que muestran un comportamiento anormal en México. Por ejemplo, los índices de precipitación total de días muy húmedos (R95p) y extremadamente húmedos (R99p) están afectados por la presencia de fenómenos naturales como huracanes. Si bien se nota un ligero cambio en su distribución espacial, esta está sujeta a la trayectoria e intensidad de los huracanes.

La duración de la temporada de estiaje (CCD) se ha prolongado en gran parte del territorio nacional y muestra tendencias de extensión temporal en los estados de Chihuahua, Sonora y en algunas regiones del estado de Chiapas. En contraste, la duración de la época de lluvias (CWD) muestra un incremento notable en los últimos años, siendo menor a la de la temporada de estiaje. Su distribución espacial ha comenzado a generalizarse por el país y se concentra principalmente en ambas costas mexicanas y la región centro de México. Sin embargo, existe una tendencia a que disminuya en algunas regiones del estado de Chiapas para concentrarse en el Estado de México, Morelos y Ciudad de México.

Este análisis muestra el desarrollo en los últimos 30 años de las modificaciones y variaciones climáticas en los regímenes termales y de precipitación en México. Las alteraciones en alguno de los regímenes impactan en los componentes del otro. Dicho impacto tiene eco en la morfología de los ríos y cuerpos de agua; en la distribución, ciclos de vida y comportamiento de especies y, en el caso de las comunidades humanas, tiene efectos en la salud, seguridad alimentaria, seguridad hídrica y en las economías locales y/o globales de los países.

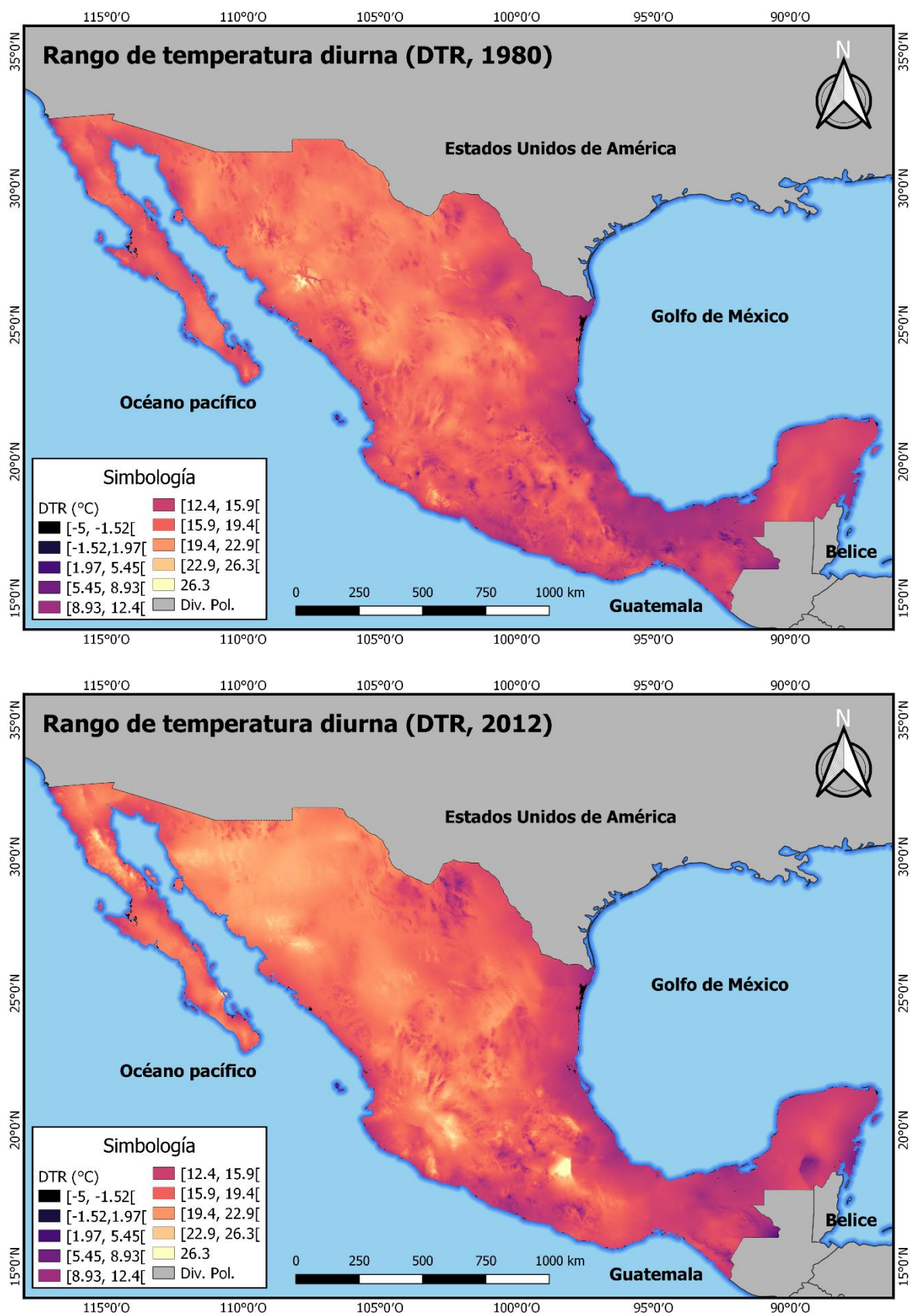


Figura 6.36 Rango de temperatura diaria (DTR) para los años 1980 y 2012.

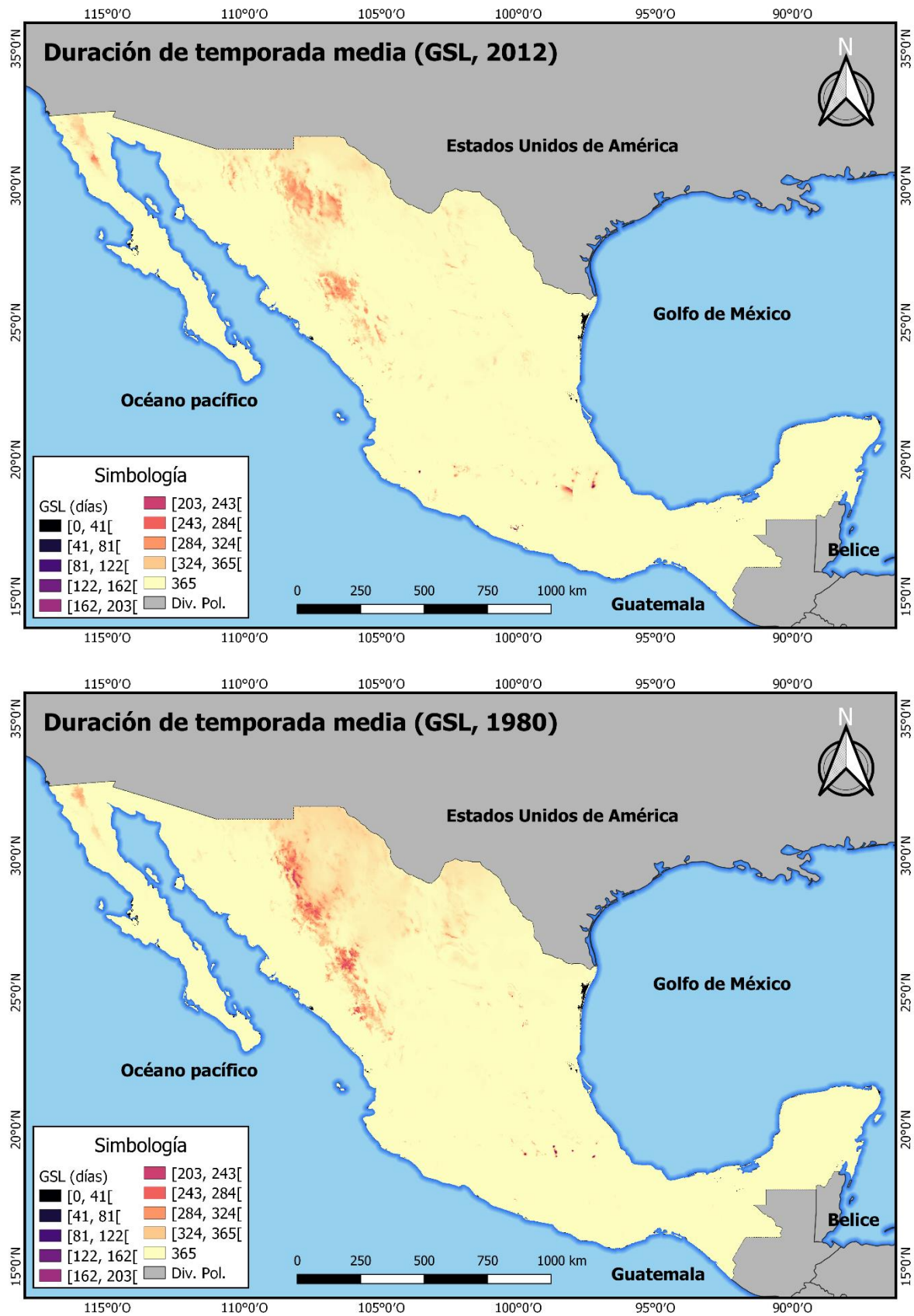


Figura 6.37 Duración de temporada media (GSL) para los años 1980 y 2012.

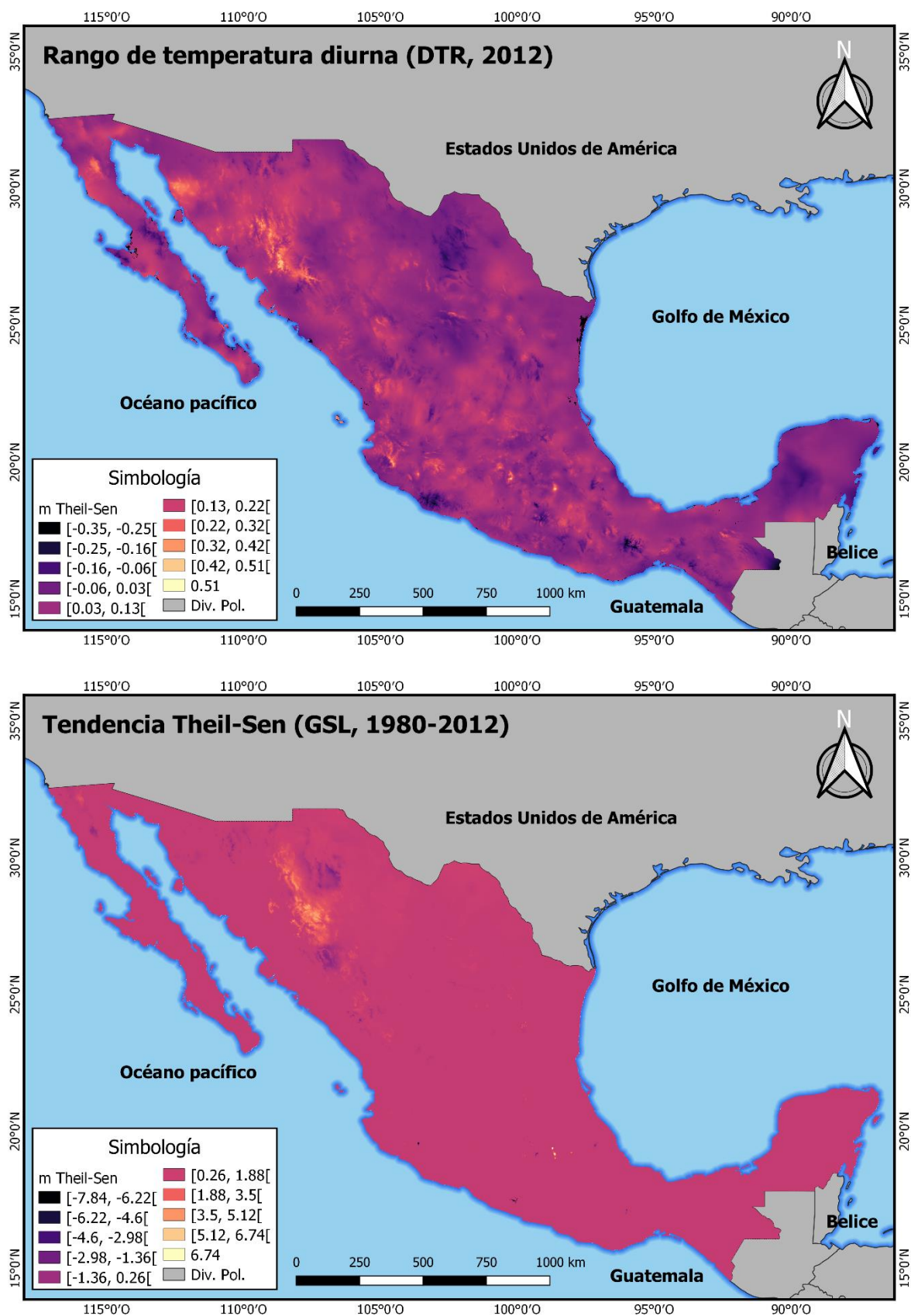


Figura 6.38 Tendencias Theil-Sen para rango de temperatura diaria (DTR) y duración de temporada media (GSL) periodo 1980-2012.

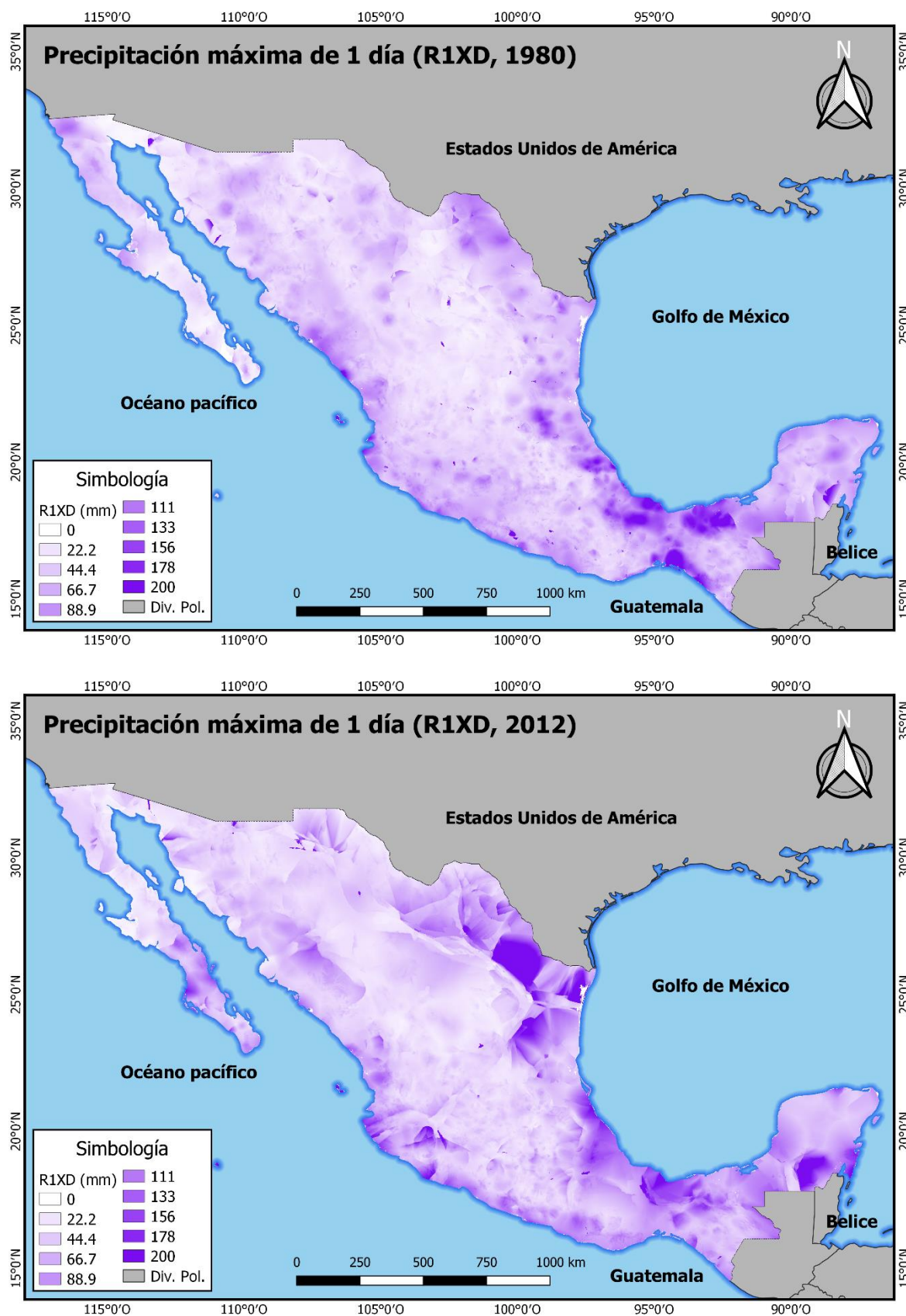


Figura 6.39 Precipitación máxima de 1 día (R1XD) para los años 1980 y 2012.

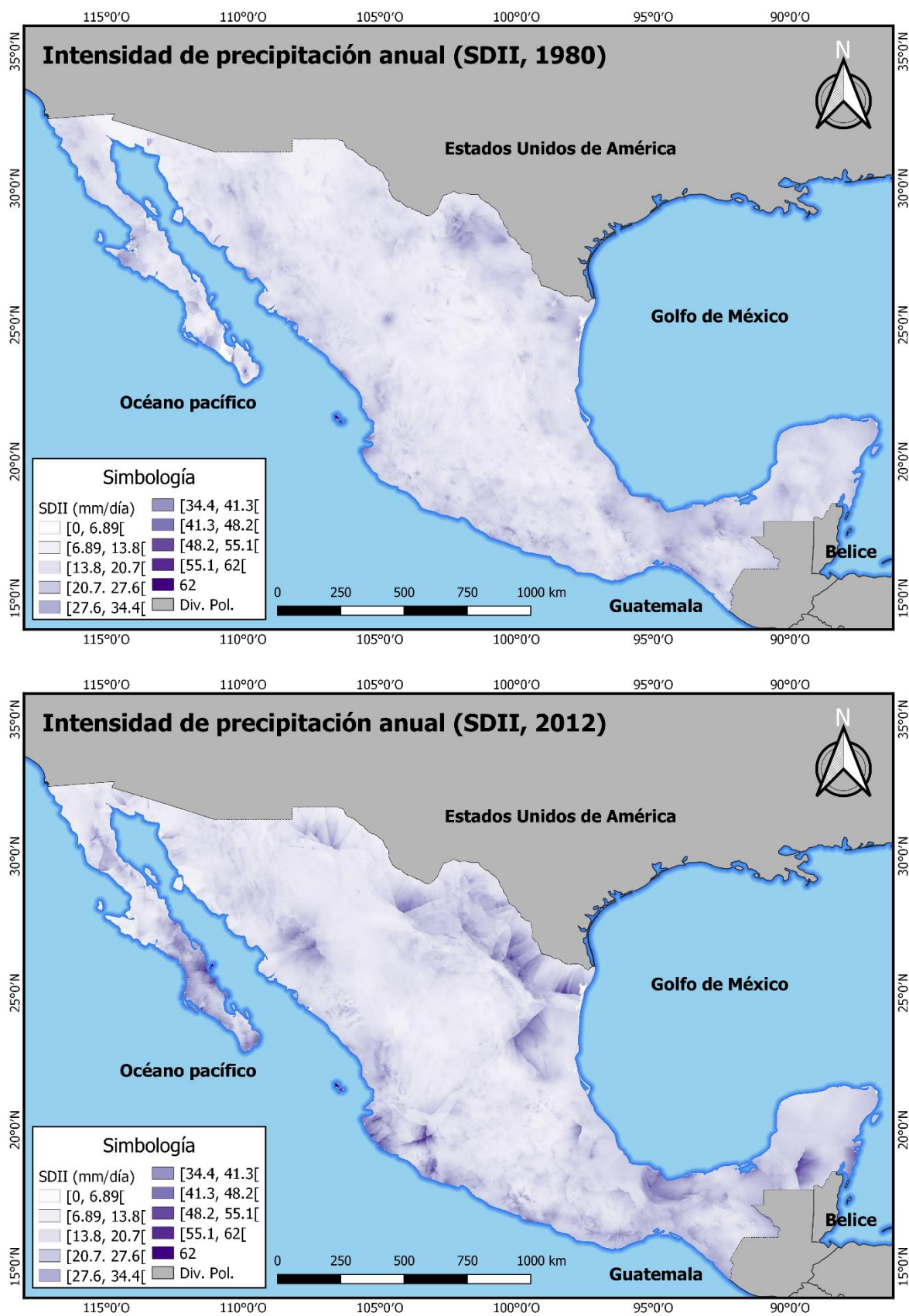


Figura 6.40 Intensidad de precipitación anual (SDII) para los años 1980 y 2012.

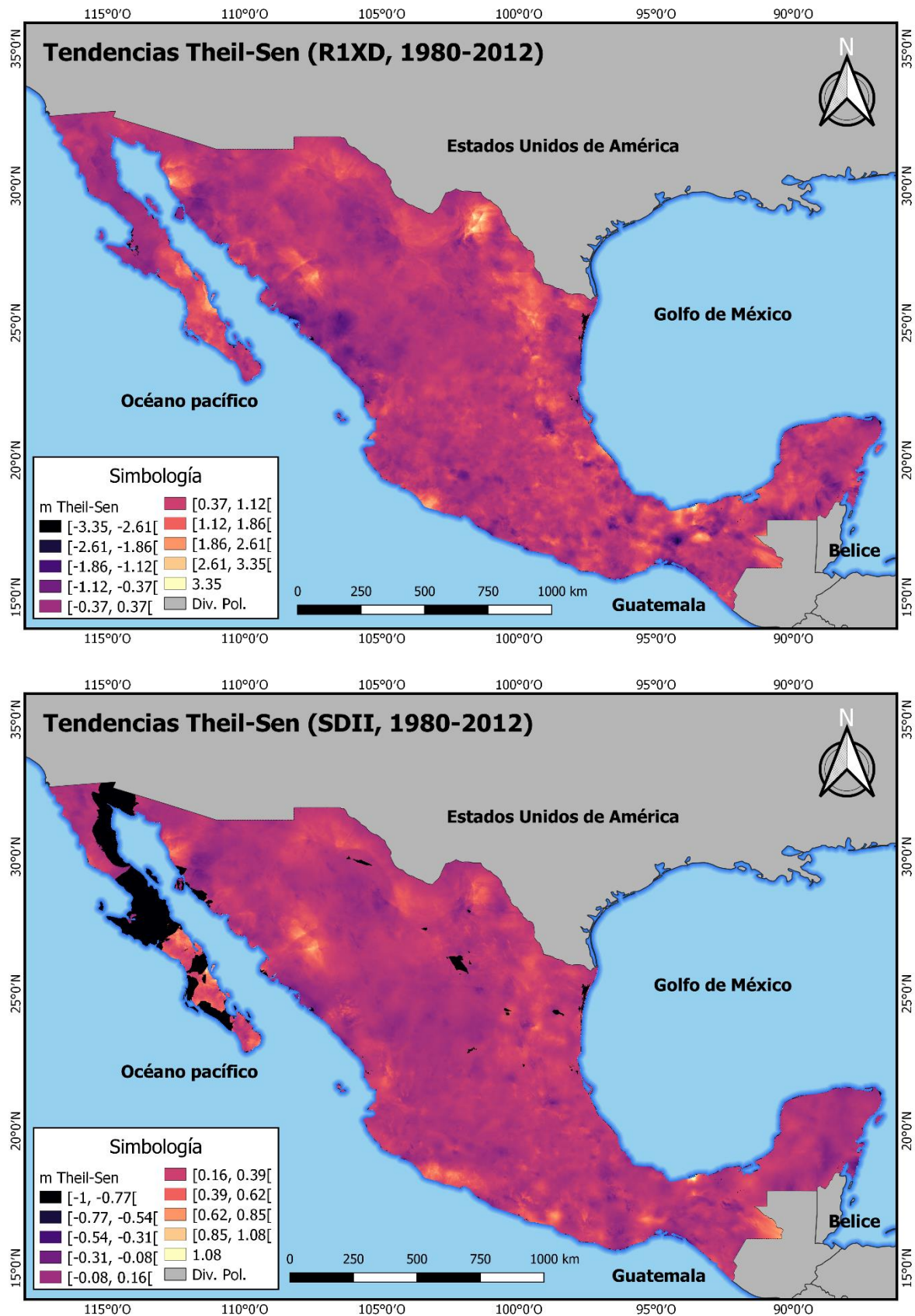


Figura 6.41 Tendencias Theil-Sen para precipitación máxima de 1 día (R1XD) e intensidad de precipitación anual (SDII) periodo 1980-2012.

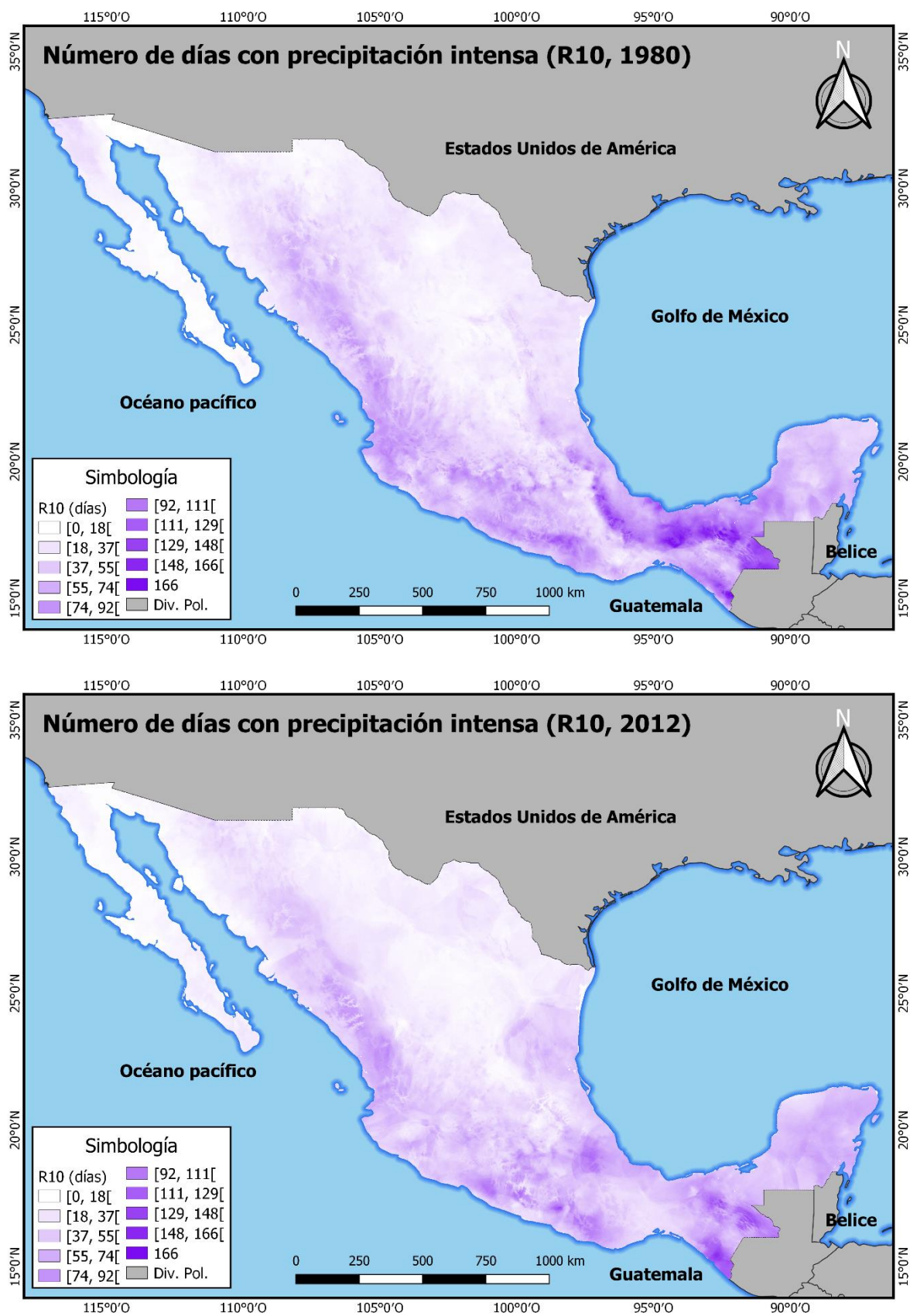


Figura 6.42 número de días con precipitación intensa (R10) para los años 1980 y 2012.

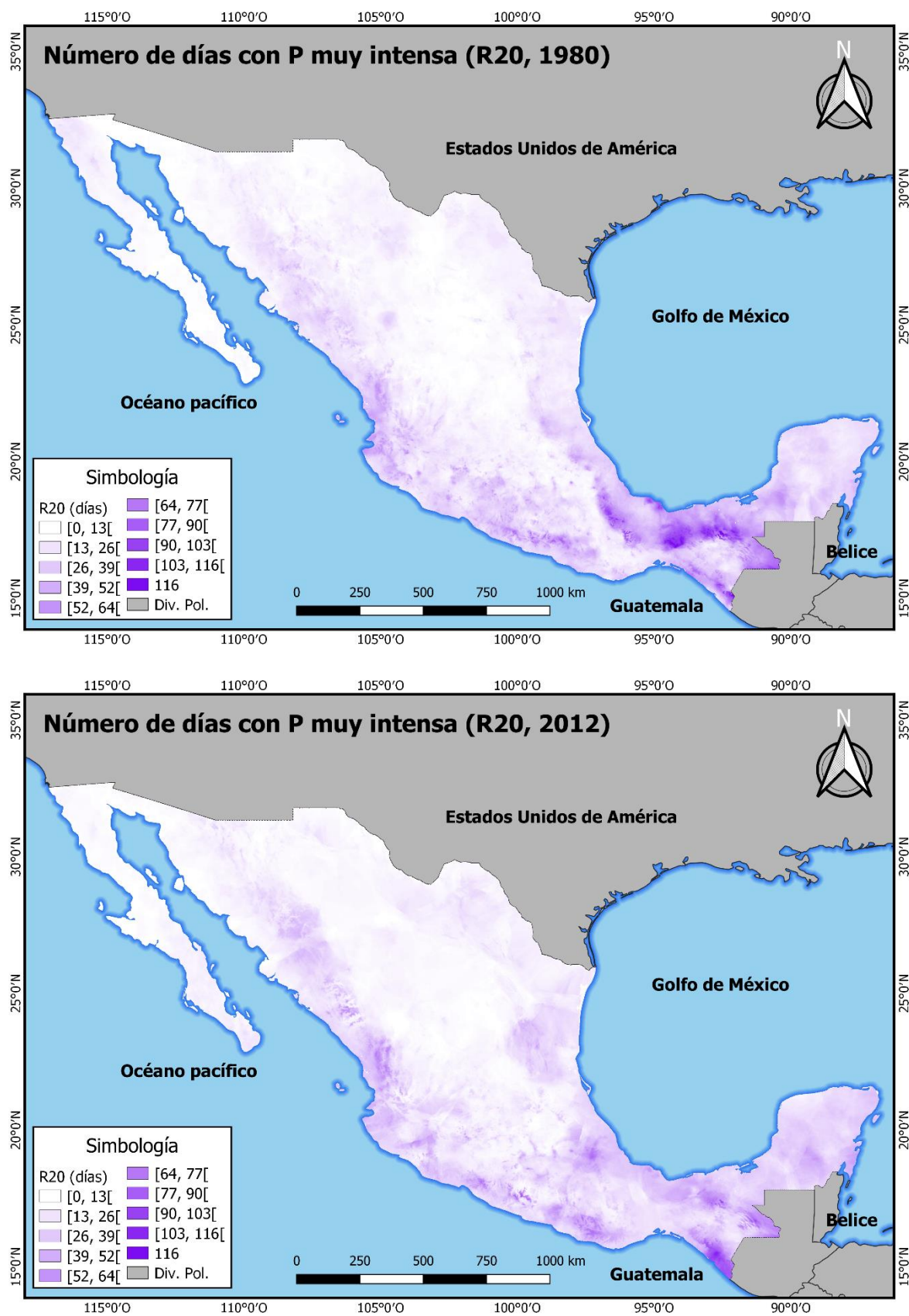


Figura 6.43 número de días con precipitación muy intensa (R20) para los años 1980 y 2012.

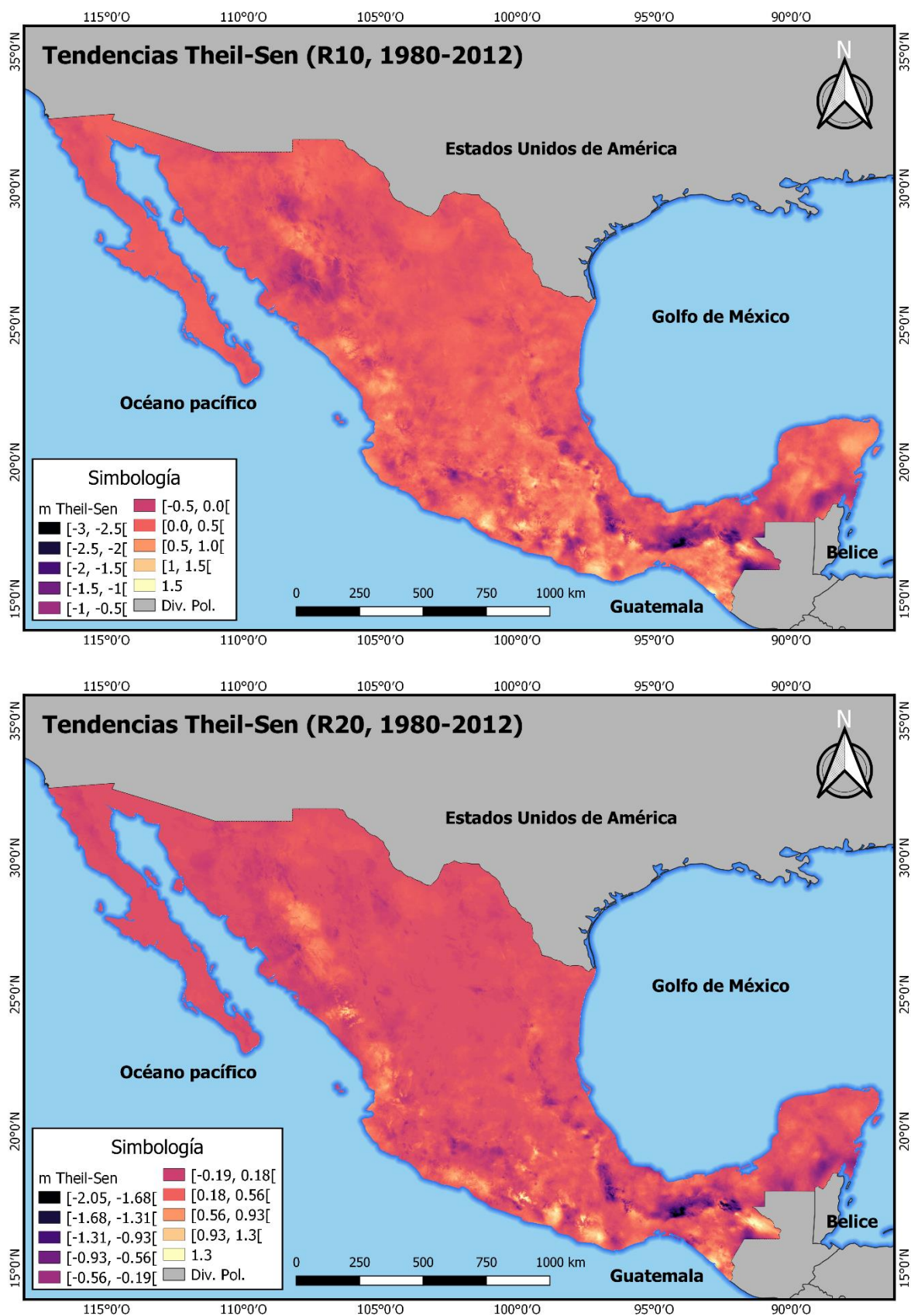


Figura 6.44 Tendencias Theil-Sen para número de días con precipitación intensa (R10) y muy intensa (R20) periodo 1980-2012.

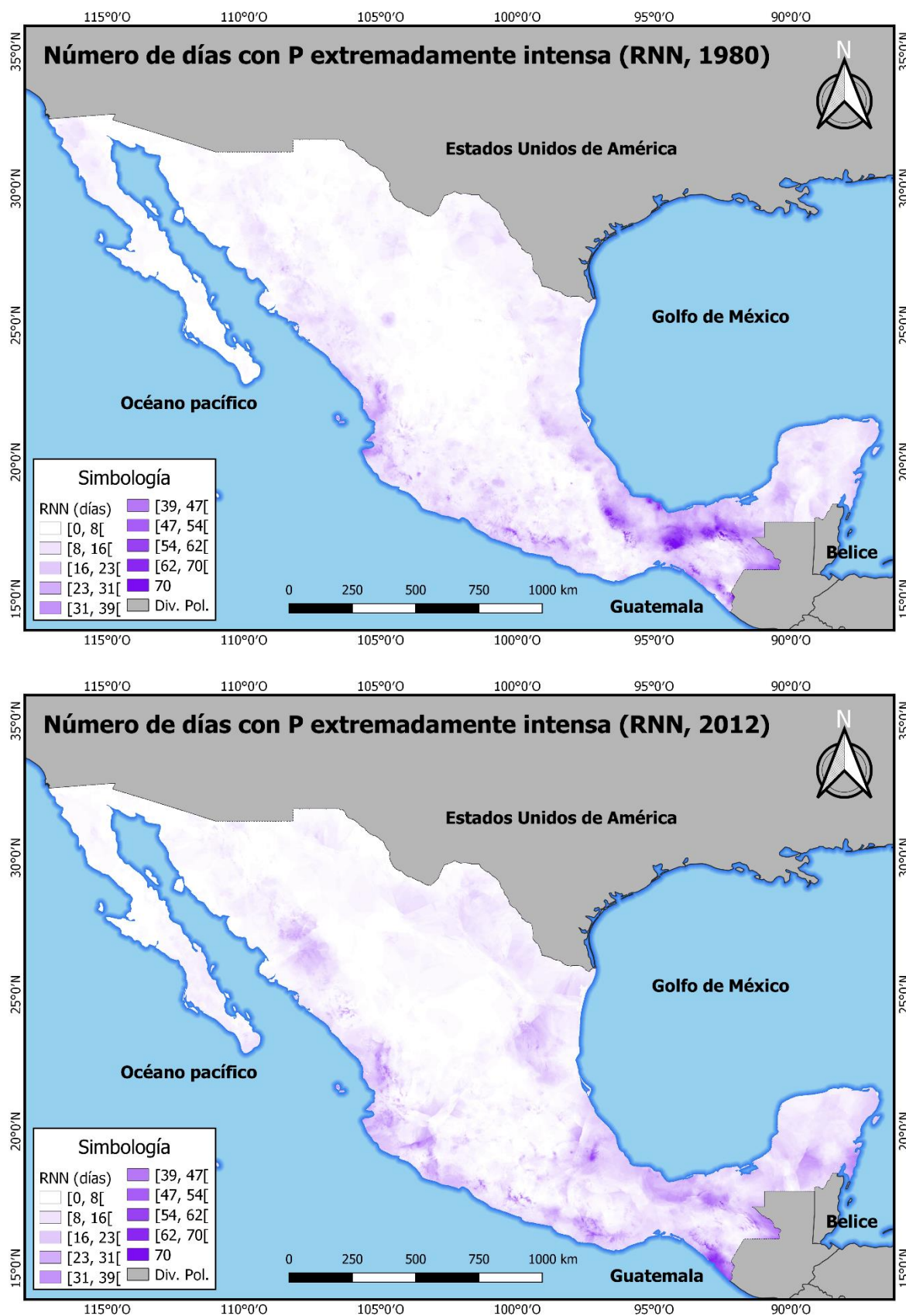


Figura 6.45 número de días con P extremadamente intensa (RNN) para los años 1980 y 2012.

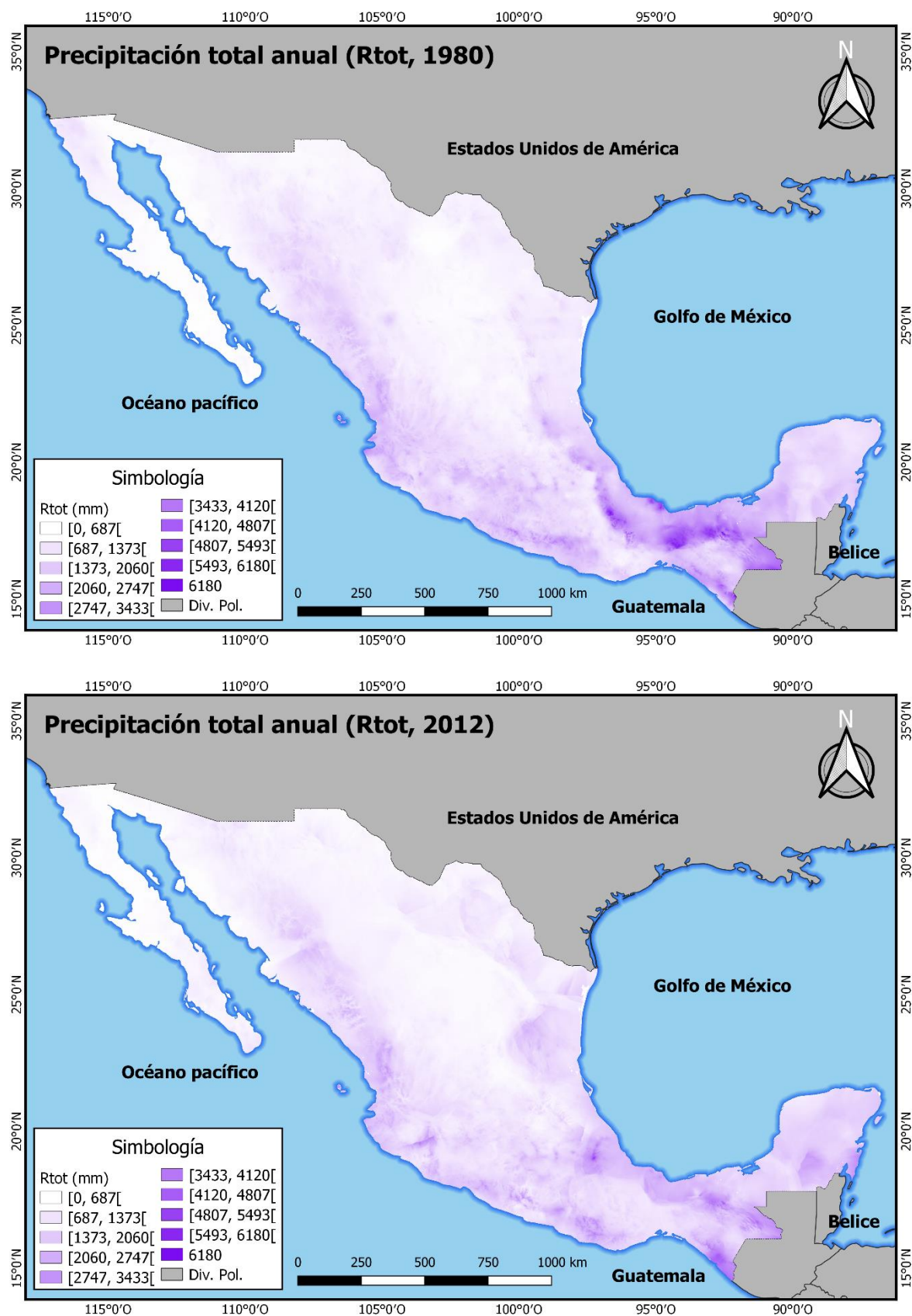


Figura 6.46 Precipitación total anual (Rtot) para los años 1980 y 2012.

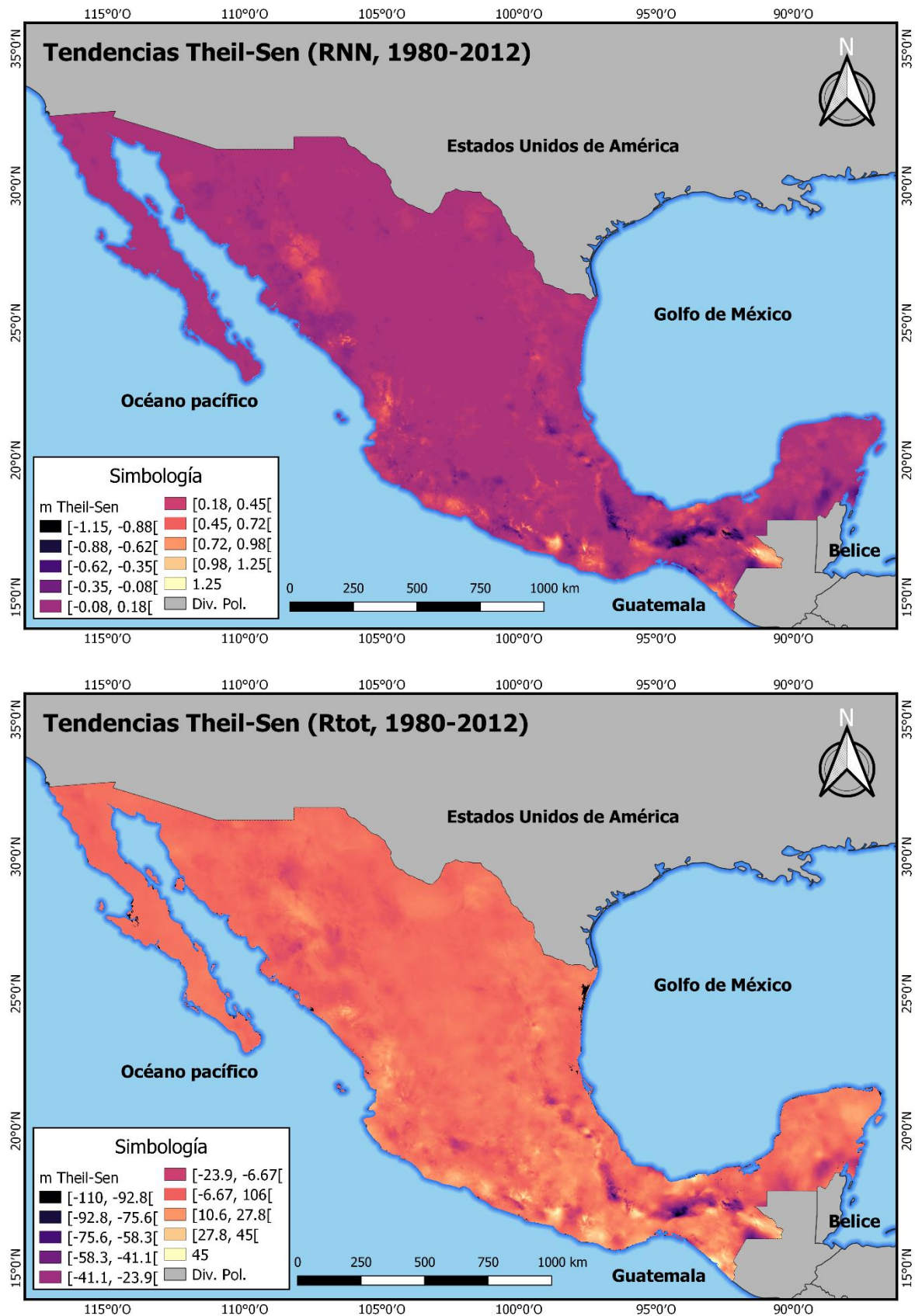


Figura 6.47 Tendencias Theil-Sen para número de días con precipitación intensa (R10) y muy intensa (R20) periodo 1980-2012.

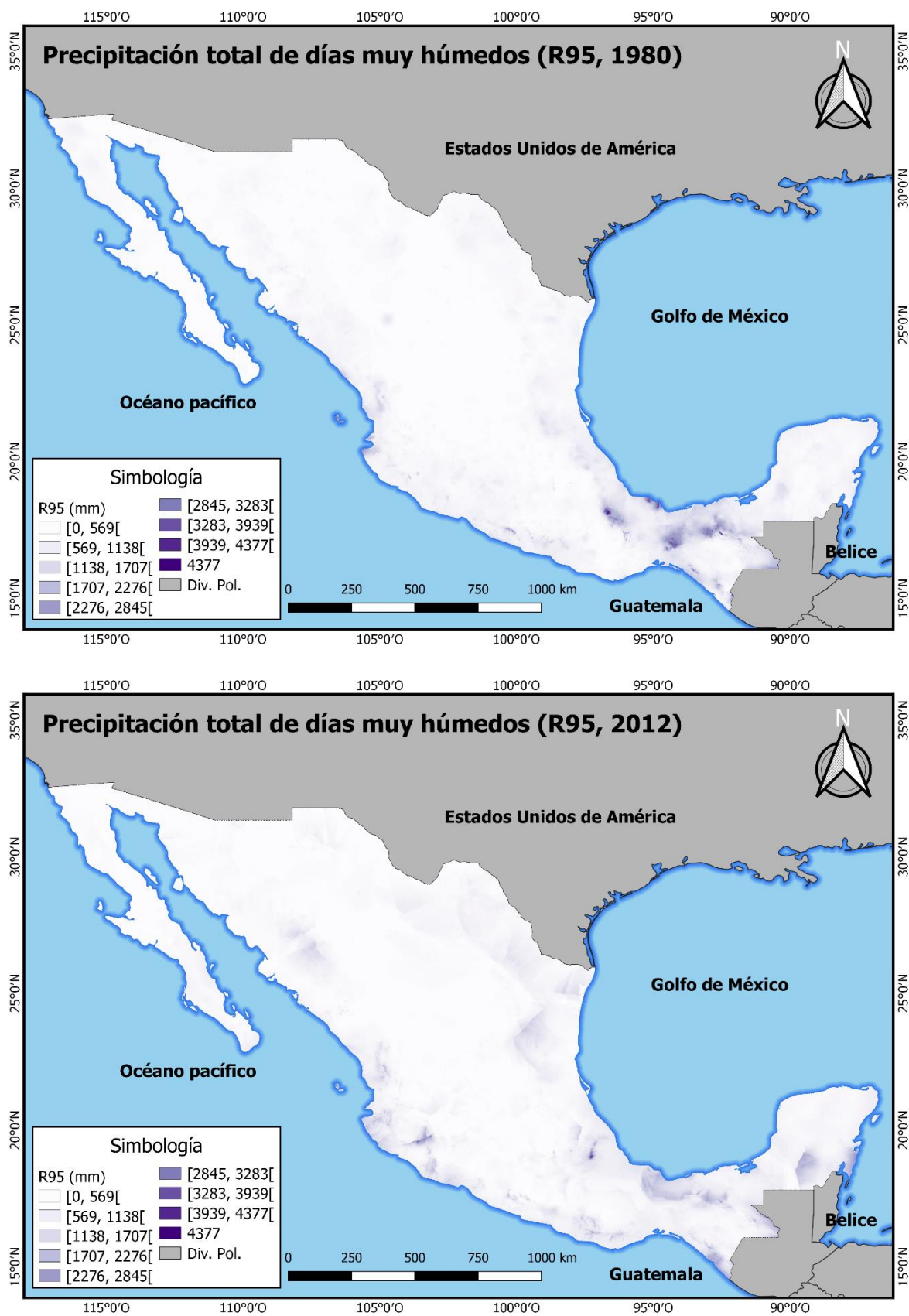


Figura 6.48 Precipitación total de días muy húmedos (R95) para los años 1980 y 2012.

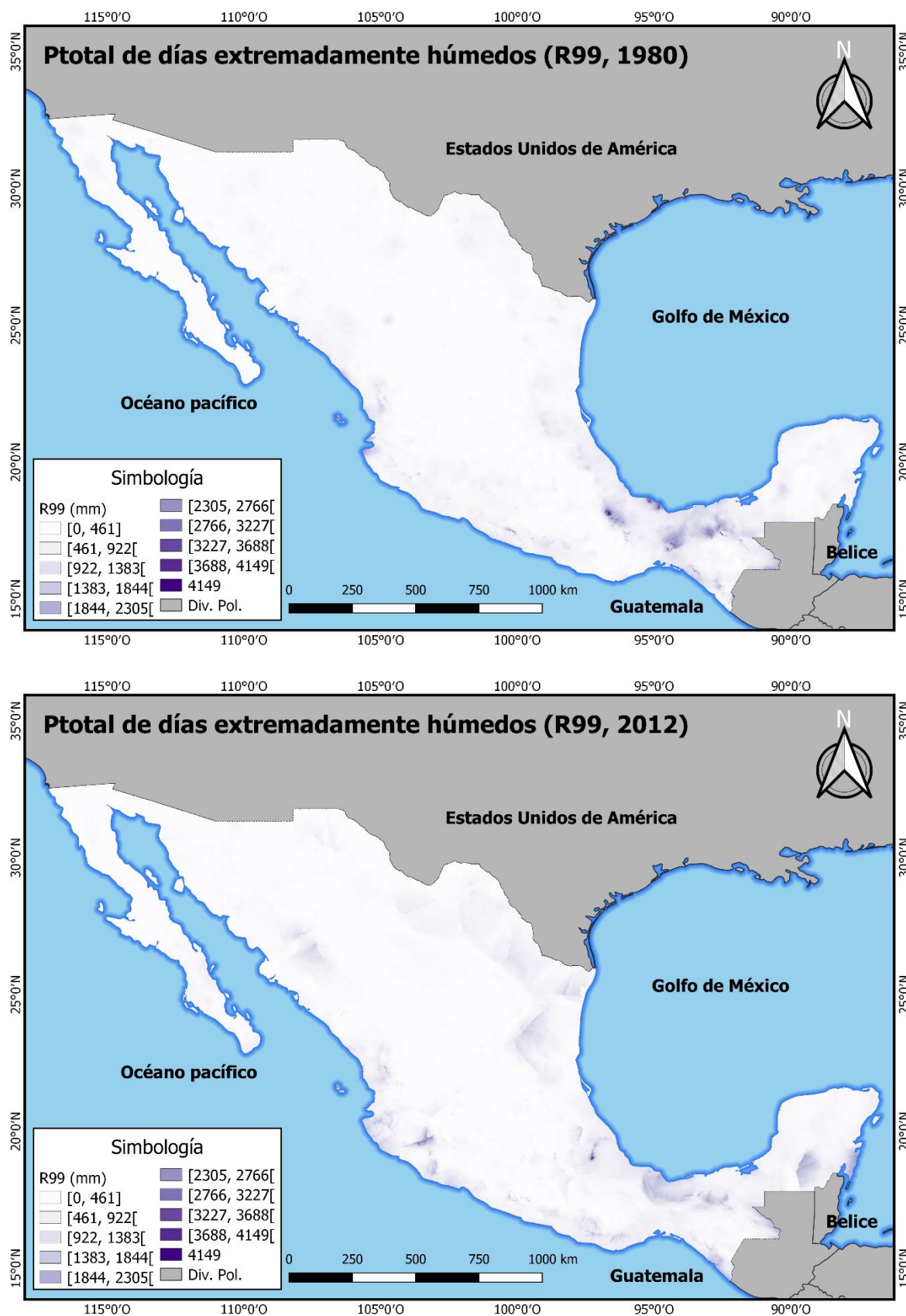


Figura 6.49 Precipitación total de días extremadamente húmedos (R99) para los años 1980 y 2012.

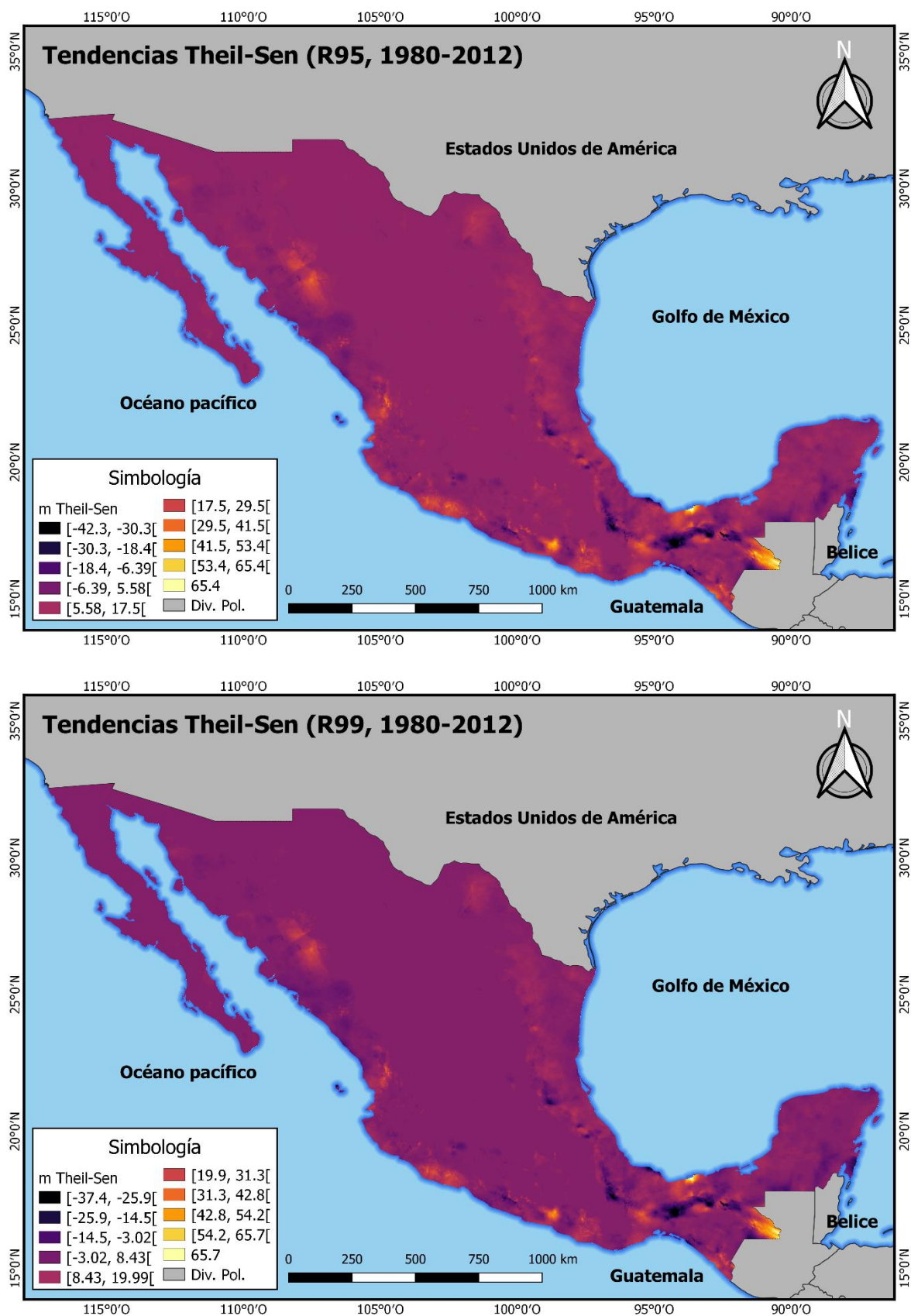


Figura 6.50 Tendencias Theil-Sen para precipitación total de días muy húmedos (R95) y extremadamente húmedos (R99) periodo 1980-2012.

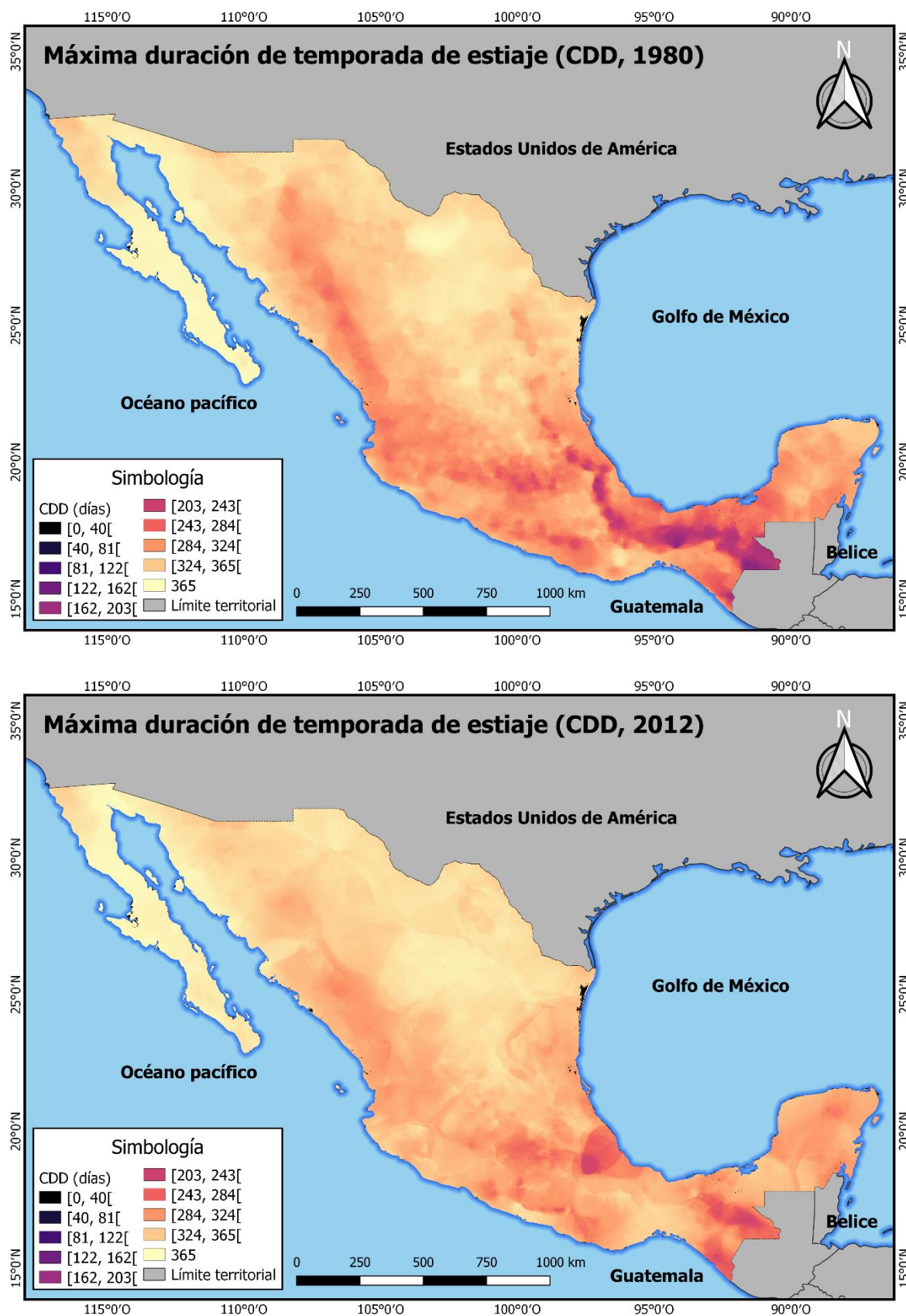


Figura 6.51 Máxima duración de temporada de estiaje (CDD) para los años 1980 y 2012.

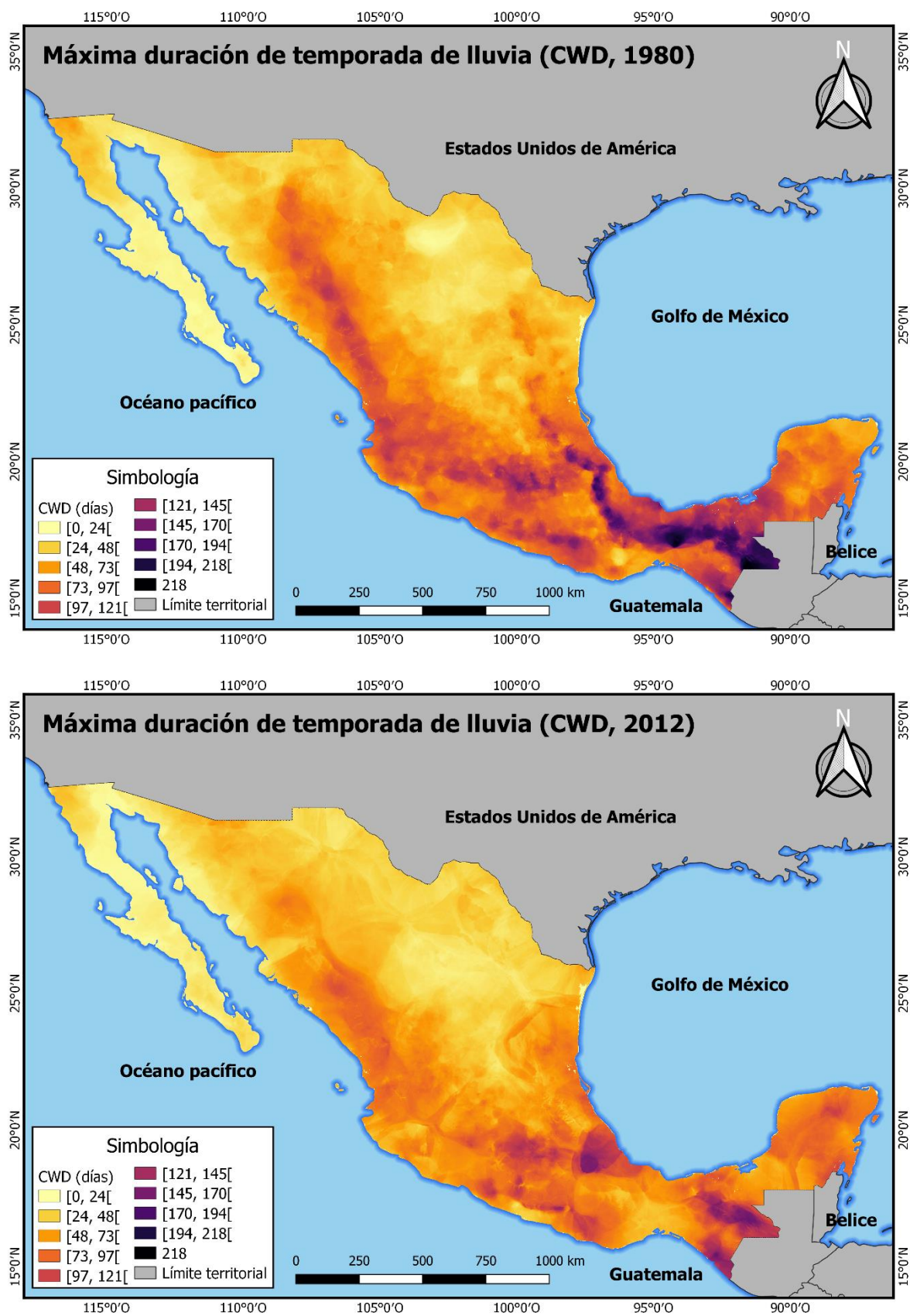


Figura 6.52 Máxima duración de temporada de lluvia (CWD) para los años 1980 y 2012.

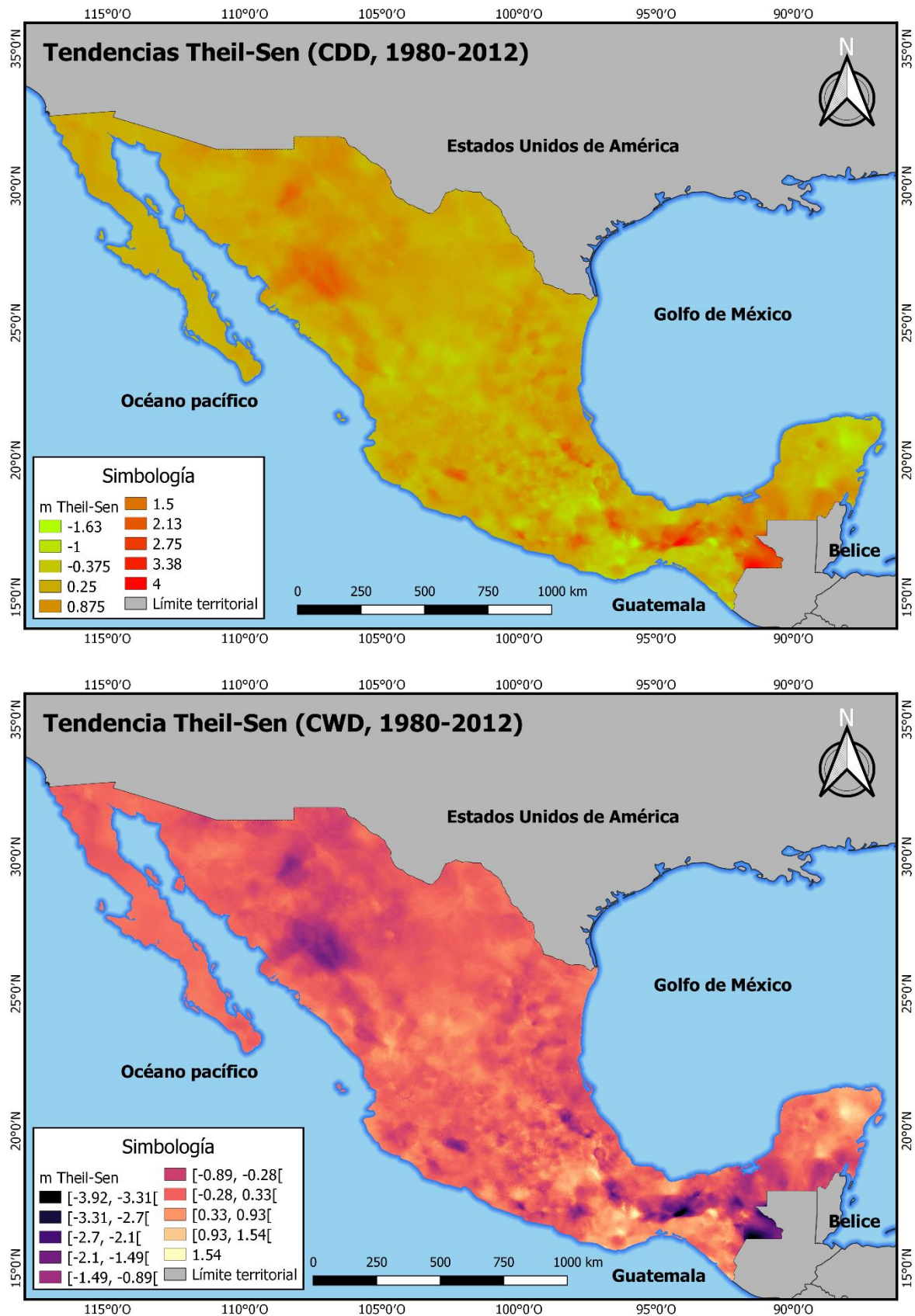


Figura 6.53 Tendencias Theil-Sen para máxima duración de la época de estiaje (CDD) y de lluvia (CWD) periodo 1980-2012.

Prueba Mann-Kendall

Los resultados de la prueba Mann-Kendall explican la significancia de la pendiente Theil-Sen (m_{T-S}) para un nivel de confianza de 0.95. Los resultados fueron divididos en dos partes para cada una de las 27 imágenes de tendencia obtenidas: i) áreas donde m_{T-S} es positiva y ii) áreas donde m_{T-S} es negativa. Los efectos combinados de los ICCs (traslapes) mostrarían las variantes del comportamiento del clima. Dichas variantes deben considerar el signo de la m_{T-S} , por lo que se tendrían 54 capas traslapadas y sus efectos no se visualizarían apropiadamente. Por tal razón, se agrupan los ICC según la variable climática que evalúan (Tabla 6.2) para reducir el número de traslapes y visualizar los efectos combinados por variable climática (Figura 6.54).

Tabla 6.2 Agrupación de ICCs por variable climática que evalúan.

No. ICCs	Variable climática				
	T _{máx}	T _{mín}	T _m	P = 0 mm	P > 0 mm
1	SU25	F0	DTR	CDD	RX1D
2	IDO	TR20	GSL		SDII
3	TX _x	TN _x			R10
4	TX _n	TN _n			R20
5	WSDI	CSDI			Rnn
6	TX10p	TN10p			R95p
7	TX90p	TN90p			R99p
8					Rtot
9					CWD

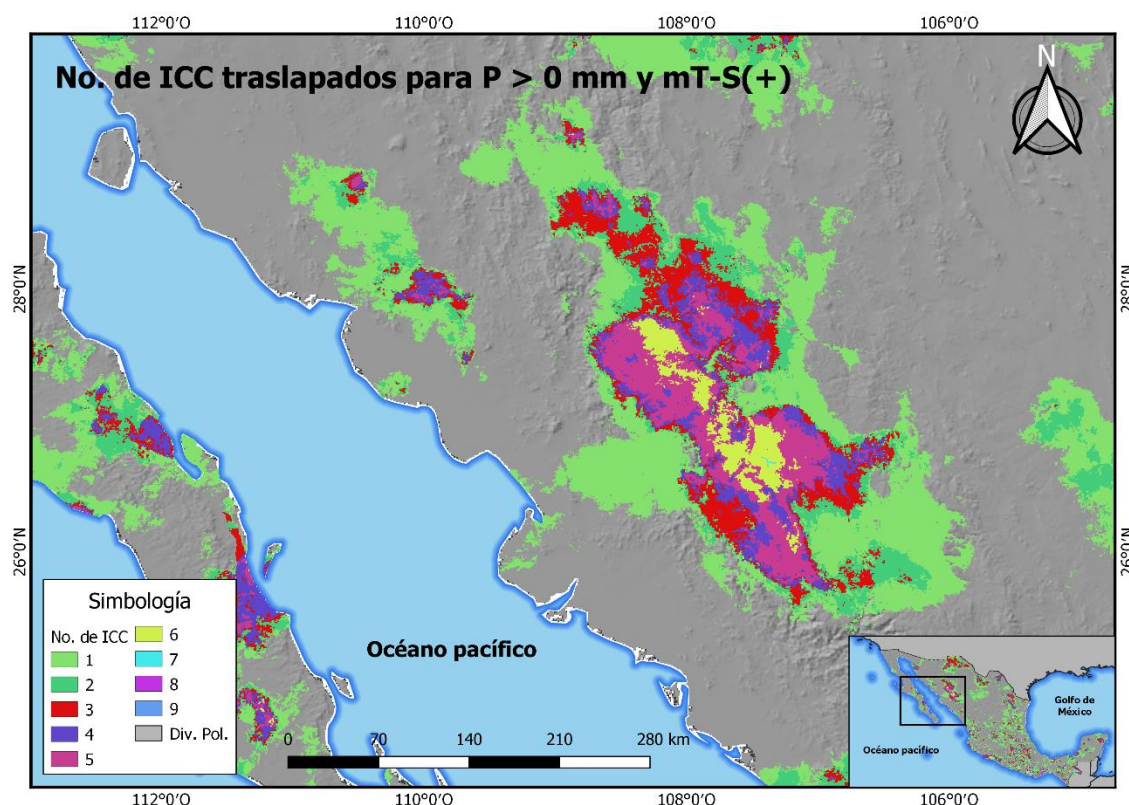


Figura 6.54 ICC traslapados para la clasificación P > 0 mm de la Tabla 6.2.

Las variantes de los traslapes (Figura 6.54) permiten clasificar la significancia de la zona estudiada. Por ejemplo, si se analizan los efectos del cambio en la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), existen siete índices que se pudieran traslapar (Tabla 6.2). Si los siete índices traslapados muestran una m_{T-S} positiva, su significancia es mayor que si sólo se traslaparan dos. Así, la significancia Mann-Kendall queda clasificada en función del número de ICCs traslapados para las temperaturas máxima, mínima (Figura 6.55) y precipitación no nula (Figura 6.56).











m_{T-S}			
(-)	(+)		
		Significancia baja	(Significancia Mann-Kendall sin traslape)
		Significancia media	(2 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia moderada	(3-4 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia alta	(5-6 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia en riesgo	(7 significancias Mann-Kendall traslapadas)

Figura 6.55 Clasificación de significancia Mann-Kendall para $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$.











m_{T-S}			
(+)	(-)		
		Significancia baja	(1-2 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia media	(3-4 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia moderada	(5-6 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia alta	(7-8 significancias Mann-Kendall traslapadas)
		Significancia en riesgo	(9 significancias Mann-Kendall traslapadas)

Figura 6.56 Clasificación de significancia Mann-Kendall para $P > 0$ mm.

Los resultados reflejan que la temperatura máxima tiende a incrementarse en los estados del norte de México siendo la colindancia entre Sonora y Chihuahua, así como la colindancia entre Tamaulipas y Nuevo León las zonas de mayor riesgo (Figura 6.58). Otra área importante donde la $T_{\text{máx}}$ tiene tendencias significativas a seguir incrementando su magnitud, es el eje trazado desde la costa del Pacífico al Golfo de México (latitudes entre los 21° a 23°). Por otra parte,

una pequeña región del bajo y el sureste de México muestra una tendencia significativa de reducir la magnitud de la temperatura máxima.

En cuanto a la temperatura mínima, en general, las zonas donde se está incrementando la temperatura máxima conlleva a incrementar la magnitud de la temperatura mínima (Figura 6.58). Un caso de contraste es el norte de los estados de Tamaulipas y Nuevo León, donde la $T_{mín}$ tiende a reducirse a una tasa de $0.13^{\circ}\text{C}/\text{año}$ (Figura 6.19). Esto sugiere que el clima en la zona indicada tiene altas posibilidades de volverse muy extremo: con altas temperaturas durante el verano y bajas temperaturas en el invierno. Otro caso de contraste es el centro de la república mexicana, donde se presentan tendencias de incrementar la $T_{máx}$ y, al mismo tiempo, reducir la magnitud de la $T_{mín}$.

En cuanto a la duración de la temporada de estiaje, se aprecia que tiende significativamente a prolongarse en la mayor parte del país (Figura 6.59). Solamente el norte de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Yucatán muestran probabilidades de reducir su periodo de estiaje a causa de un incremento de la precipitación en las zonas. Por otro lado, la precipitación muestra una tendencia de incremento en las regiones centro, sur y sureste de México (Figura 6.59). Así mismo, se observa un incremento de las precipitaciones en algunos estados del norte de la república. También, se muestra una tendencia de incremento en el régimen de lluvias en el estado de Sinaloa y ligero incremento en el estado de Nayarit y la costa sur de Jalisco.

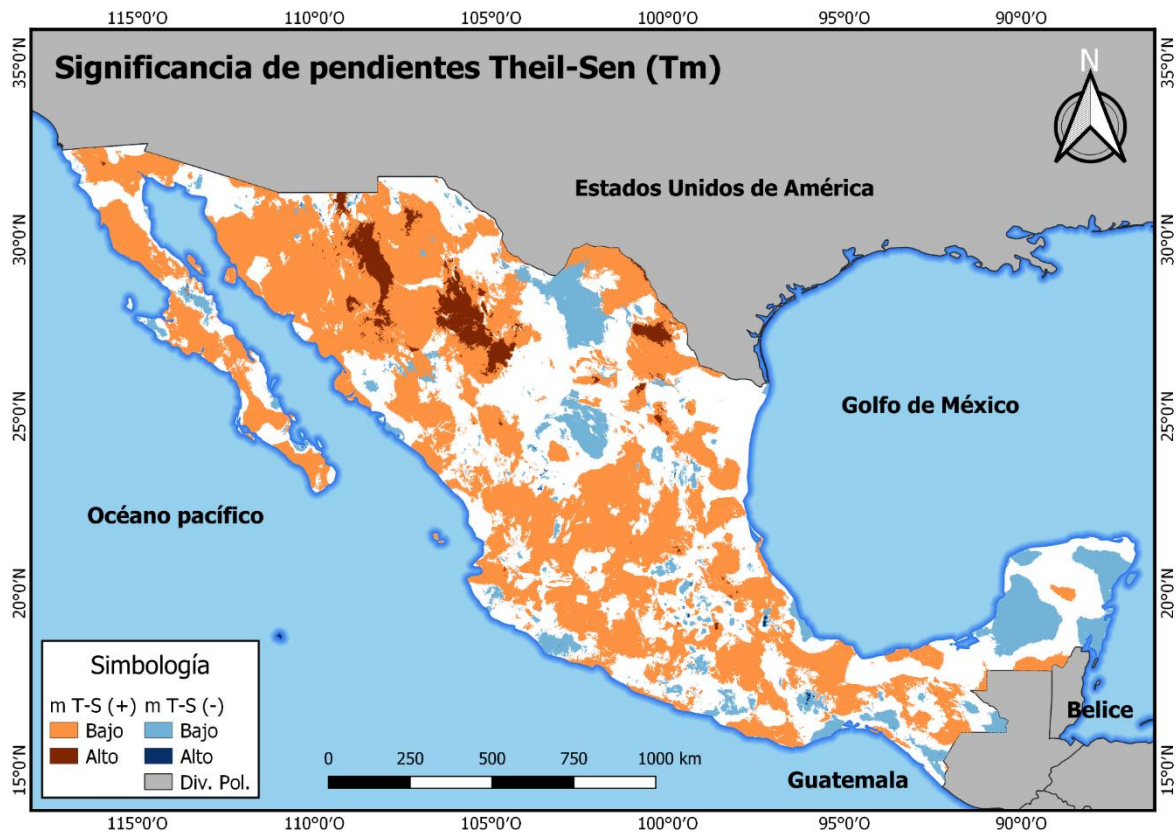


Figura 6.57 Significancia Mann-Kendall para temperatura media (T_m) según signo de la m_{T-S} .

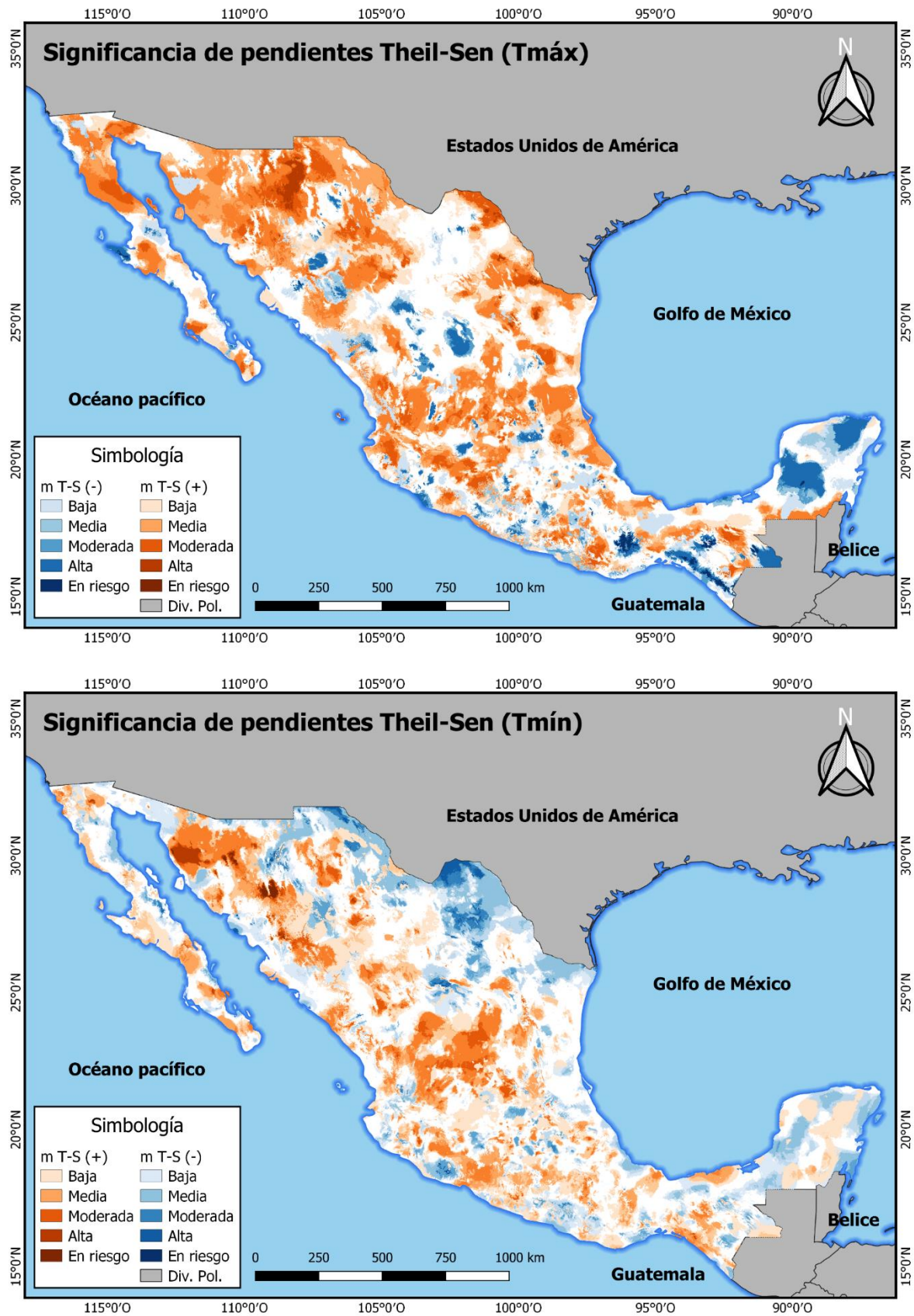


Figura 6.58 Significancia Mann-Kendall para temperatura máxima ($T_{máx}$) y temperatura mínima ($T_{mín}$) según signo de la $m_{T.S.}$.

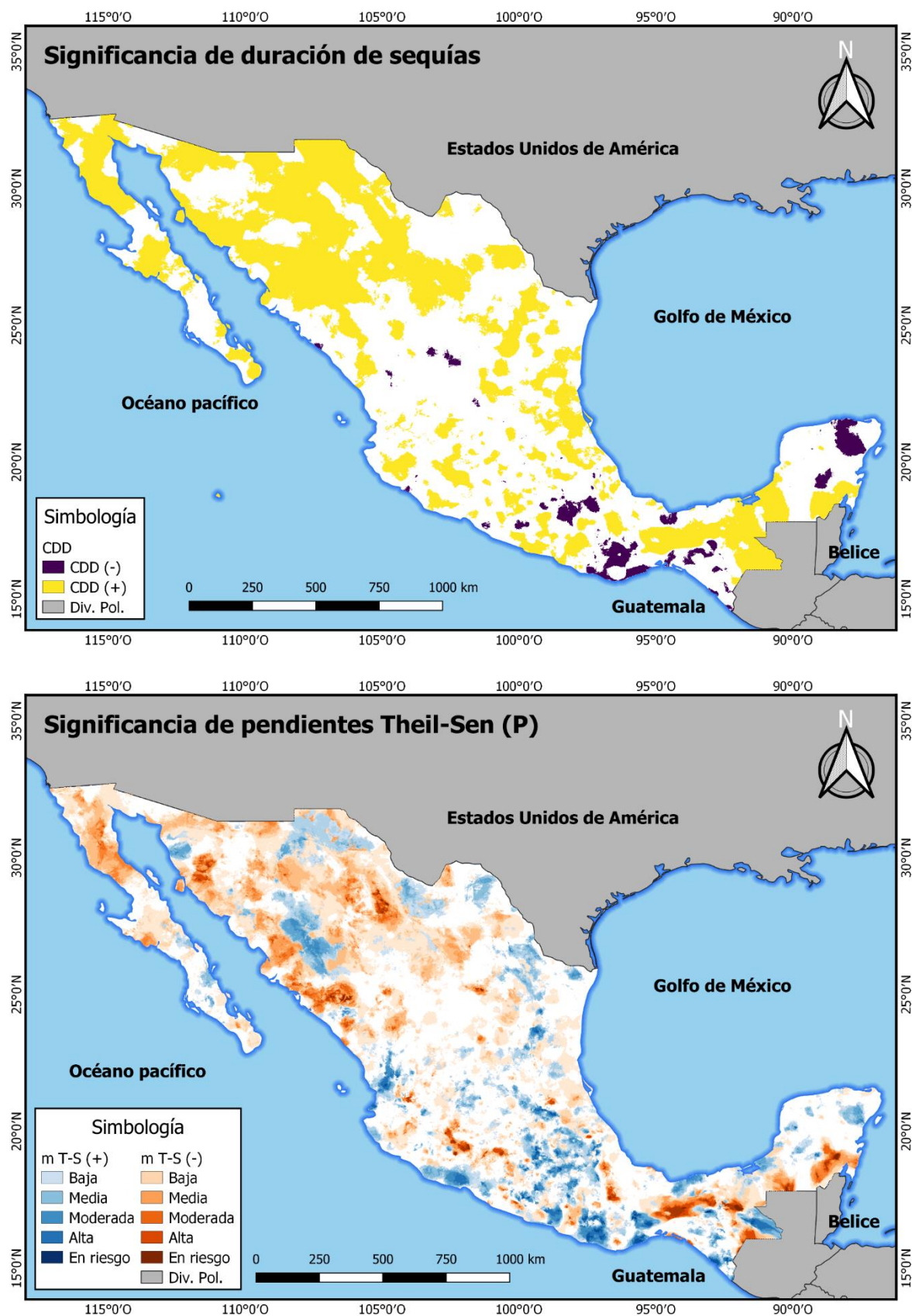


Figura 6.59 Significancia Mann-Kendall para precipitación nula ($P = 0$ mm) y precipitación no nula ($P > 0$ mm) según signo de la m_{T-S} .

Relación de cambio climático a nivel de cuenca hidrológica

La afectación por cambio climático a nivel de cuenca está en función de los efectos combinados (traslapes) de todas las variables climáticas (Figura 6.57 a Figura 6.59). Dichos efectos están presentes en todo el territorio nacional por lo que resultaría poco pragmático suponer que existen cuencas no afectadas por cambio climático. Por tanto, se clasifican sus efectos en función del porcentaje del área de cuenca afectada por cambio climático (AA_{CC} ; Figura 6.60). Los resultados se presentan para el grupo de cuencas no alteradas obtenidas en el capítulo 4 de la presente investigación (Figura 4.13; ver resultados por cuenca y variable climática en anexo digital).

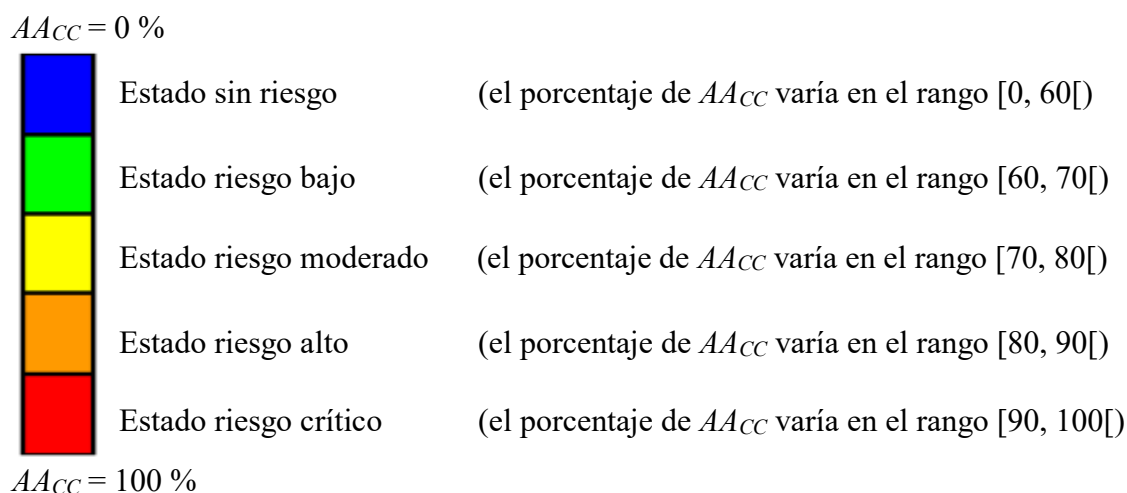


Figura 6.60 Clasificación del porcentaje de área de cuenca afectada por cambio climático (AA_{CC}).

La clasificación muestra 3 cuencas en el centro de la república mexicana sin afectación significativa al cambio climático. Cabe señalar que son microcuencas pertenecientes a tributarios del río Jamapa y del curso alto del río Lerma. Se cuenta con un total de 13 cuencas con riesgo bajo a efectos de cambio climático mismas que se encuentran localizadas en las Sierras Madres Occidental y Oriental, así como en el sur de México. Por otro lado, 19 cuencas fueron identificadas con riesgo moderado al cambio climático. Este grupo de cuencas se concentran en el centro, sur y este de México. Sin embargo, el 84.91% de las cuencas no alteradas presentan de riesgos altos (74 cuencas) a riesgos críticos (116 cuencas). Finalmente, 7 de las 232 cuencas no alteradas presentaron resultados inconclusos debido a que una parte significativa de su parteaguas se encuentra fuera de las fronteras nacionales.

El análisis realizado muestra que los efectos del cambio climático están presentes en casi todo el país. Por tanto, se deben elaborar planes tácticos estratégicos para su mitigación y/o adaptación. Dichos planes y acciones deben ser formulados por un equipo multidisciplinario con enfoque en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Una breve discusión de medidas de acción se presenta en los párrafos siguientes.

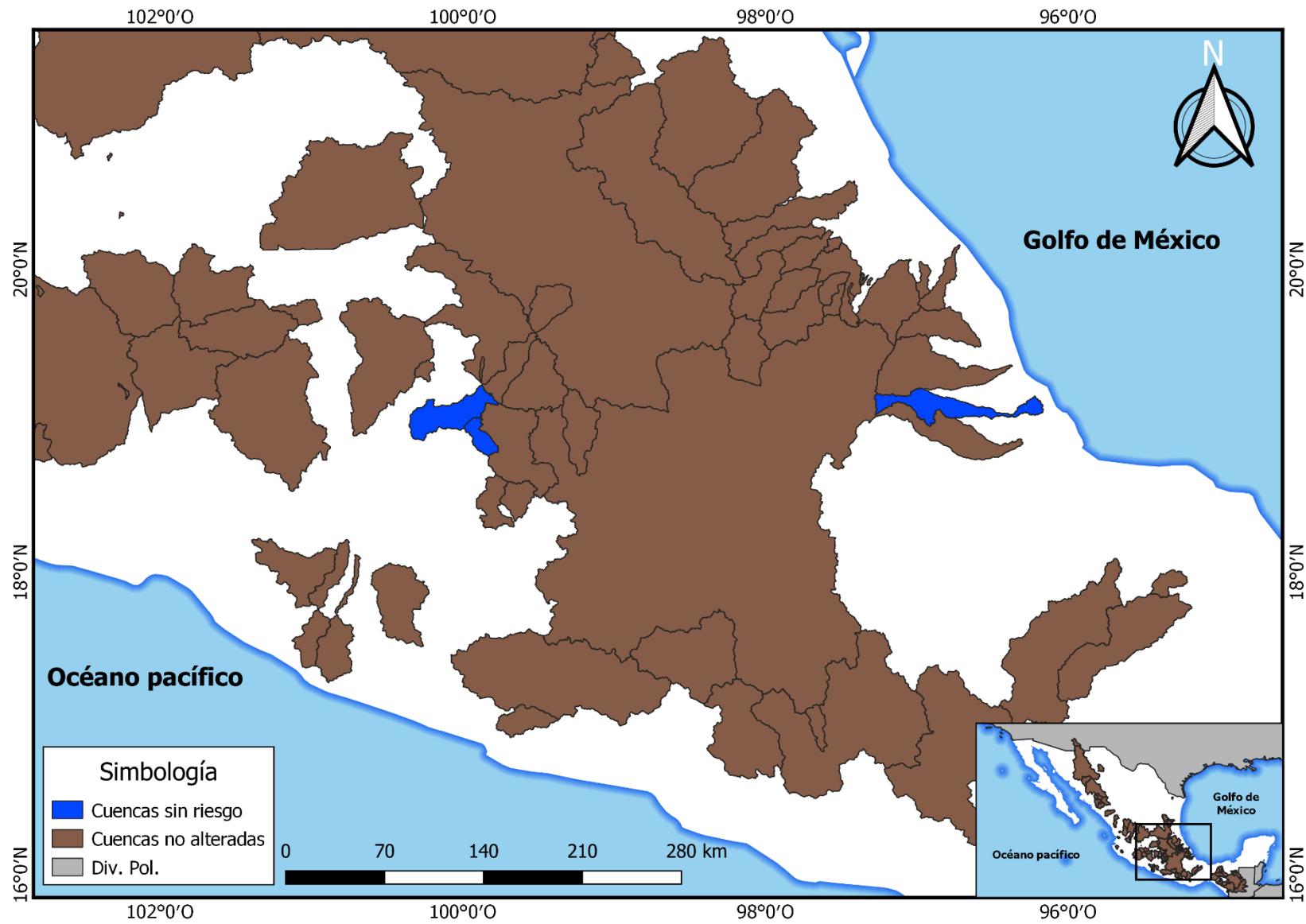


Figura 6.61 Mapa de cuencas no alteradas sin riesgo climático significativo.



Figura 6.62 Mapa de cuencas no alteradas con riesgo climático bajo.



Figura 6.63 Mapa de cuencas no alteradas con riesgo climático moderado.



Figura 6.64 Mapa de cuencas con riesgo climático alto.



Figura 6.65 Mapa de cuencas no alteradas con riesgo climático crítico.

6.4. Conclusiones y recomendaciones

Las imágenes de tendencia y su significancia, producto de la presente investigación, pueden ser empleadas para el desarrollo de planes de alerta en las áreas de mayor riesgo por efectos de cambio climático. Los efectos de cada variable climática pueden tener diferentes impactos en el país. Por ejemplo, el norte de México presenta una tendencia significativa a incrementar la magnitud de la temperatura máxima (Figura 6.58) y la duración del periodo de estiaje (Figura 6.59) por lo que es evidencia suficiente para justificar planes de contingencia ante posibles sequías en dicha área.

El incremento en la duración del periodo de estiaje trae consecuencias en regiones de producción agrícola y ganadera. A su vez impacta la seguridad alimentaria y la economía de la república. Por ello, se recomiendan las siguientes acciones relacionadas con el problema agrícola y ganadero:

- Evaluar la producción agrícola en términos de litros de agua de producción y porcentaje de consumo por actividad destinada (e.g: producción agrícola para importación, consumo local, consumo ganadero, etc.) para monitorear el uso final del recurso hídrico.
- Realizar estudios de demanda de agua por semilla sembrada. Si la semilla requiere más agua de la posible suministrada, se puede realizar alguna modificación genética para adaptar el cultivo a las condiciones del clima deseado. Sin embargo, cambiar el tipo de semilla por una apropiada a la disponibilidad hídrica regional es lo más eficiente. Esta última medida trae consecuencias económicas para la producción regional. Sin embargo, abre oportunidades para el comercio de otro producto agrícola con un costo de producción hídrico menor.
- Promover incentivos económicos para la diversificación de productos agrícolas con menor demanda hídrica.
- Modificar hábitos alimenticios en la población. El 42% de la producción agrícola mundial se destina para consumo humano, el otro 58% se destina para la alimentación y producción ganadera (FAO, 2018). Producir 1 kg de verduras requiere 5,300 l de agua al año, mientras que producir 1 kg de carne requiere 14, 780 l de agua (Tyler y Spoolman, 2015).
- Implementar sistemas de conducción de riego subterráneos para evitar pérdidas por evaporación. Dichos sistemas deben ser monitoreados para la detección y prevención de fugas de agua.
- Implementar horarios de riego que eviten la hora de máxima insolación solar para evitar pérdidas por evapotranspiración. Se recomienda emplear supresores de evaporación (FAO, 2018) para menguar las pérdidas del recurso hídrico.
- Reforestar las áreas circundantes a los canales de riego y parcelas para evitar pérdida de nutrientes por erosión y reducir la temperatura ambiente. La demanda hídrica del árbol, empleado para dicho efecto, debe ser adecuada a la disponibilidad hídrica de la región.

Por el contrario, el centro de la república y el sur de México muestran tendencias a modificar el régimen de lluvias. Si bien el volumen puede disminuir, la intensidad de lluvia se

incrementará (Figura 6.40). Esto lleva a escenarios de posibles inundaciones en las regiones mencionadas por lo que también justifica el desarrollo e implementación de sistemas de alerta temprana contra inundaciones. Se recomiendan las siguientes medidas para la prevención y/o manejo de inundaciones:

- Implementar programas de reubicación social en áreas elevadas para reducir el riesgo de pérdidas por inundación. Desde 1999 a 2011, México ha invertido 1,460 millones de dólares cada año para la reconstrucción social por desastres de inundaciones. Por tanto, menos exposición a la pérdida material por inundación, podría involucrar una menor inversión en la reconstrucción de daños.
- Implementar programas de construcción de viviendas que permitan hacer frente a las condiciones de la inundación. Por ejemplo, cimentaciones un poco más elevadas en zonas cercanas a ríos o arquitecturas de menor exposición a corrientes de viento en presencias de huracanes (e.g: formas circulares y/o cónicas).
- Eficientar los programas de respuesta y ayuda ante los desastres por inundación.
- Mejorar las condiciones del terreno en las zonas riparias. Filtros de materiales granulares a unos metros de distancia de los ríos permitirían captar parte del agua desbordada y canalizarla al subsuelo.
- Reforestar en las orillas del río. Los árboles permiten reducir la energía cinética de la corriente lo que implica una reducción en el posible daño causado por corrientes rápidas.
- Mantenimiento oportuno en los sistemas de alcantarillado y saneamiento en las zonas urbanas.

El estudio realizado de cambio climático se enfoca en las variaciones de la dinámica del clima de manera regional y/o global. Sin embargo, debe complementarse con estudios de otras áreas científicas, económicas y sociales para buscar posibles detonadores antropogénicos que facilitan las variaciones climáticas. Por ejemplo, las actividades ganaderas son responsables de una cuarta parte de la producción mundial de gas metano (CH_4) y se puede identificar mediante análisis de cambio de uso de suelo. Dicha labor requiere del monitoreo exhaustivo de la mayor cantidad de variables posibles que guarden alguna relación con la cantidad y/o calidad del agua, del aire y/o del suelo. Por ello, se debe ampliar la red de monitoreo climático, niveles piezométricos de acuíferos, redes hidrométricas, evaluar la cantidad y calidad de las fuentes de agua, evaluar los impactos socioeconómicos por desastres como sequías y/o inundaciones etc., en áreas de mayor riesgo social, económico o que involucren pérdida de hábitat.

El sector gubernamental juega un papel importante en la legislación de políticas y normatividades orientadas a la prevención y/o adaptación al cambio climático. Por tal razón, se realizan las siguientes recomendaciones al sector gubernamental:

- Establecer políticas para la regulación de los recursos hídricos para formular un estado de “banco hidrológico” con la finalidad de administrar y manejar las extracciones y

concesiones de agua como “préstamos del capital natural nacional” que los concesionarios y destinatarios finales deberán pagar en servicios forestales u otros similares.

- Imponer límites al crecimiento de la mancha urbana y promover programas de reacomodo social con una planeación urbana estructurada.
- Habilitar normas de carácter obligatorio para recircular agua tratada en todas las localidades con crecimiento poblacional desmedido.
- Monitorear el cumplimiento de las leyes existentes de manera más rigurosa, particularmente las de carácter de usos del agua y tratamiento de residuos industriales.
- Implementar legislaciones para incrementar las áreas verdes en ciudades y comunidades. De ser necesario, reubicar la población según un plan de desarrollo urbano sostenible.
- Establecer bonos de agua que impliquen un incentivo económico a la sociedad para su conservación voluntaria (e.g: deducibles de impuestos o bono salarial).
- Implementar programas de regulación poblacional para reducir la demanda de recursos naturales.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECOLÓGICO

7.1. Introducción

Al realizar estudios sobre caudal ecológico, se analiza el estado actual del ecosistema y se plantean objetivos específicos de condiciones deseadas en el futuro (Bunn y Arthington, 2002; Tharme, 2003). Dichos objetivos están basados en la protección y/o rehabilitación del ecosistema ripario. Aun cuando los ecosistemas acuáticos se encuentren articulados por variables físicas, químicas y ecológicas; son los componentes ecológicos los que regularmente son citados como objetivos deseables al implementar mejoras en el caudal ecológico (Poff et al., 2017). Recientemente, dichos objetivos se han enfocado en el estudio de las respuestas hábitat-caudal-sociedad (Webb et al., 2017).

Los recientes métodos para estimar el caudal ecológico se enfocan, en general, en predecir el comportamiento de las especies y sus respuestas ante variaciones del flujo de agua (Arthington, 2012). Así mismo, buscan comprender la relación existente entre el caudal y las modificaciones en los parámetros físicos del hábitat. Incluso los métodos holísticos más robustos, realizan predicciones de alteración del hábitat confiando completamente en las relaciones empíricas registradas en la bibliografía científica, así como en el conocimiento de expertos (Hughes et al., 2014; Warner et al., 2014). Sin embargo, estas relaciones están enfocadas en los hábitats y especies estudiados. Se subraya que se carecen de modelos que expliquen las alteraciones a nivel regional, o bien, que permitan obtener relaciones que puedan ser generalizadas a otras áreas geográficas (Webb et al., 2017).

Poff et al. (2010) propusieron un marco metodológico para estimar el caudal ecológico de manera regional (ELOHA). Sin embargo, en lugares donde se han implementado regímenes ecológicos, se ha observado que no es suficiente para lograr los objetivos ambientales idealizados al inicio del estudio (Olden et al., 2014). Esto se debe a las complejas interacciones hábitat – comunidades naturales – desarrollo humano. Si bien, existen modelos físicos de hábitat (Lamouroux et al., 2017) y métodos holísticos que explican estas relaciones (e.g: DRIFT y BBM), su uso requiere una abundante información empírica que, generalmente, no se encuentra organizada y/o disponible en países en desarrollo (PNDU, 2016).

7.2. Métodos estadísticos de análisis caudal-respuesta biológica

A diferencia de los métodos de modelación física del hábitat (Lamouroux et al., 2017), los métodos estadísticos también permiten establecer relaciones empíricas del hábitat. Su facilidad de implementación puede ser vista desde la complejidad del método y la cantidad de información requerida. De esta forma, existen métodos con baja complejidad, pero requisitan abundante información para ser alimentados y/o calibrados. Por el contrario, existen métodos donde la información inicial no es un factor determinante, pero la complejidad del modelo incrementa para poder inferir las relaciones deseadas con la escasa información. Los métodos estadísticos más usados se describen en las secciones posteriores.

7.2.1. Modelos lineales

Estos modelos son los más simples de aplicar y su uso ya no es ampliamente popular debido a la poca resolución que tienen a una escala regional. Sin embargo, si existe alguna variable dominante que explique la mayor parte de la varianza en el sistema, las regresiones lineales pueden ser útiles para producir predicciones ecológicas confiables. Driver et al. (2005) aplicaron este tipo de modelos para predecir el número de nidos de ibis (*Threskiornis molucca*) en el pantano Booligal en New South Wales, Australia. A pesar de ser un método estadístico sencillo, su coeficiente de determinación R^2 de 0.76 muestra que la mayor parte de la varianza es explicada suficientemente por sólo dos parámetros.

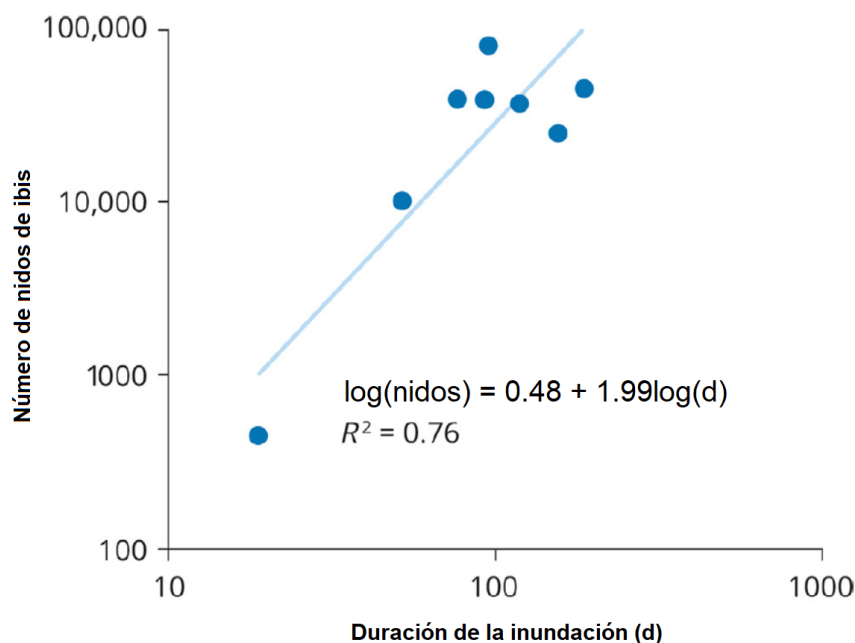


Figura 7.1 Relación lineal entre número de nidos de ibis y la duración de las inundaciones (d) en el pantano Booligal en New South Wales, Australia. Fuente: adaptada de Driver et al. (2005).

7.2.2. Modelos lineales y no lineales generalizados

Existen varios fenómenos que no pueden ser modelos por medio de una regresión lineal simple debido a su naturaleza. Por tanto, se incorporan modelos que permiten analizar datos con relaciones no lineales, residuos no Gaussianos, fenómenos intermitentes en tiempo y espacio, datos no normales (e.g: regresión logarítmica) o efectos aleatorios que pueden producir datos replicados.

Los modelos no lineales son empleados para determinar las relaciones entre los descriptores del régimen hidrológico y los indicadores de las respuestas riparias de vegetación, plantas acuáticas, comunidades de peces y medir su abundancia. La Figura 7.2a muestra una relación cuadrática inversa entre la riqueza de especies de vegetación riparia y el coeficiente de variación del caudal medio anual, con valores más bajos de riqueza en valores intermedios de caudal medio anual. La Figura 7.2b no explica la variación en la densidad de especies nativas; sin embargo, puede ser útil para explicar el fenómeno de forma sencilla a los tomadores de decisión ([Arthington, 2012](#)).

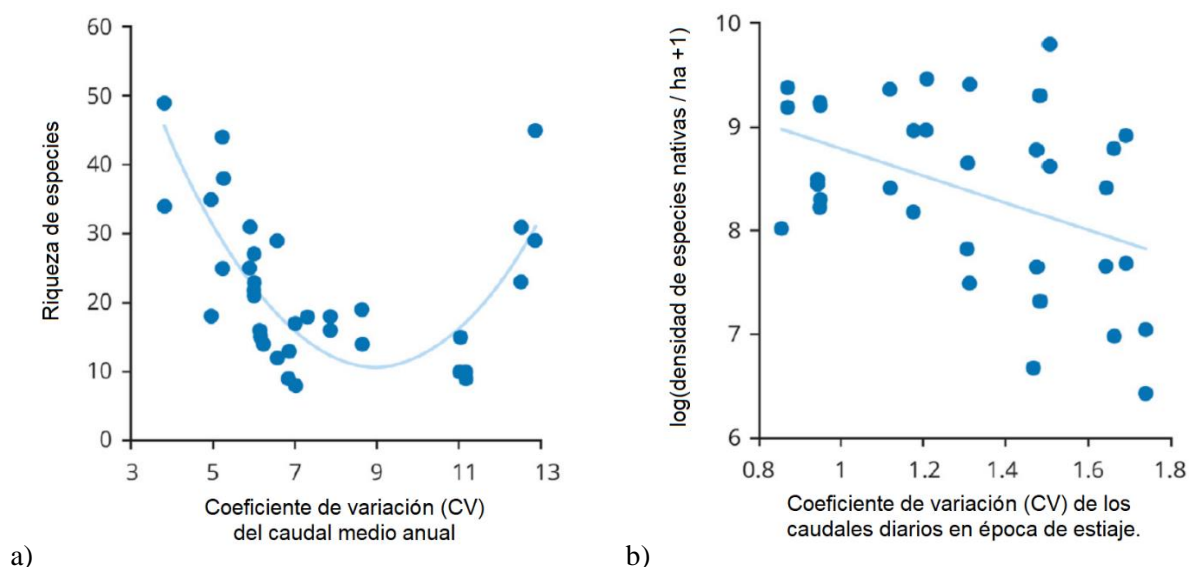


Figura 7.2 Modelos no lineales (a) y lineales (b) generalizados entre caudal y efectos bióticos en una prueba del método ELOHA en Australia subtropical. Fuente: adaptada de [Webb et al. \(2017\)](#).

7.2.3. Modelos jerárquicos

El uso de este tipo de modelos es bastante popular debido a la gran flexibilidad y habilidad de ajustarse a datos completos, incompletos y desordenados (Clarke, 2005). Dentro de los métodos más empleados se encuentran los Bayesianos, los cuales proporcionan una base matemática sólida para actualizar las relaciones empíricas del hábitat. En los métodos Bayesianos, se asume una distribución de probabilidad *a priori* para cada parámetro de entrada en el modelo. Esta distribución conforma el conocimiento previo que se tiene del

comportamiento de cada parámetro. Los datos son expresados como funciones de verosimilitud y se combinan con la distribución *a priori* para producir una nueva distribución de probabilidad que refleja las actualizaciones en las relaciones empíricas (McCarthy, 2007).

Una de las principales ventajas de los métodos Bayesianos es que permiten reducir la incertidumbre de las respuestas si la información de entrada es abundante. (McCarthy, 2007; Webb et al., 2017). Un ejemplo fue realizado por Webb et al. (2010) para predecir los efectos ambientales de los caudales ecológicos diseñados para la protección del eperlano (*Retropinna semonii*) en cinco tributarios del río Thompson en Victoria, Australia. Los resultados mostraron que la incertidumbre es reducida al usar métodos Bayesianos en comparación con regresiones lineales multivariantes.

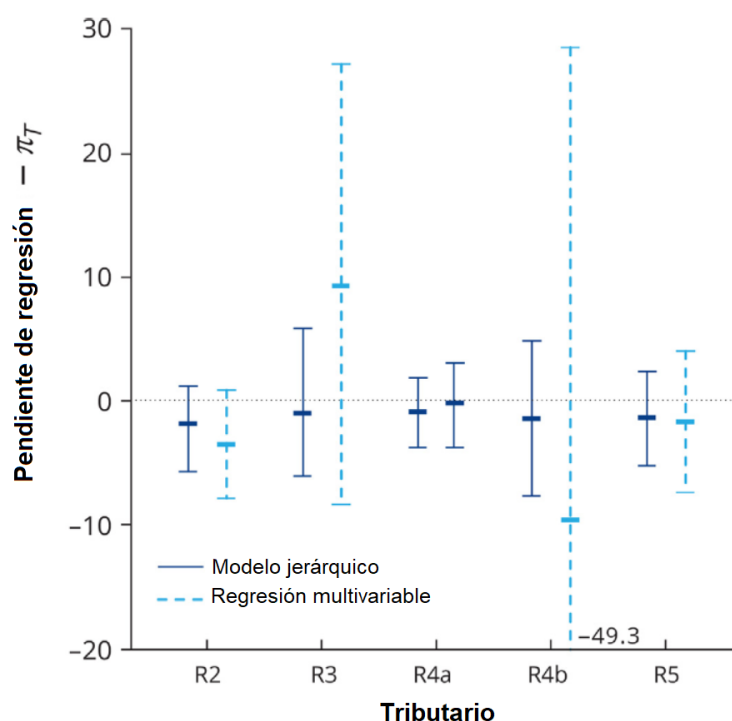


Figura 7.3 Mejoras de la incertidumbre al emplear modelos Bayesianos jerárquicos. Fuente: Webb et al. (2010).

7.2.4. Modelos de Machine Learning

Los algoritmos de *Machine Learning* (ML) se han popularizado en los estudios científicos ambientales debido a que permiten utilizar datos de sistemas complejos que, frecuentemente, no tienen relaciones lineales. Estos métodos analizan profundamente las condiciones físicas, biológicas e hidrológicas de los ríos. Sus resultados reflejan una alta precisión y confiabilidad, pero son difíciles de interpretar. Sin embargo, debido a que la mayoría son algoritmos de caja negra, el procedimiento para establecer las relaciones no es tan transparente como en otros métodos estadísticos (Webb et al., 2017).

Estos conjuntos abarcan métodos supervisados de aprendizaje que permiten modelar datos de entrada con salidas conocidas. Ejemplos de métodos supervisados son: redes neuronales, células automátatas, árboles de clasificación y regresión, lógica difusa, algoritmos genéticos, máxima entropía, algoritmos de vectores de soporte y análisis de *wavelets* (Hastie, Tibshinari y Friedman, 2008; Haykin, 2009; Kim, 2017). La Figura 7.4 muestra una red neuronal de componentes del régimen hidrológico (a largo y corto plazo), parámetros de la cuenca hidrológica y variables locales del río para predecir sus efectos en 25 especies de peces.

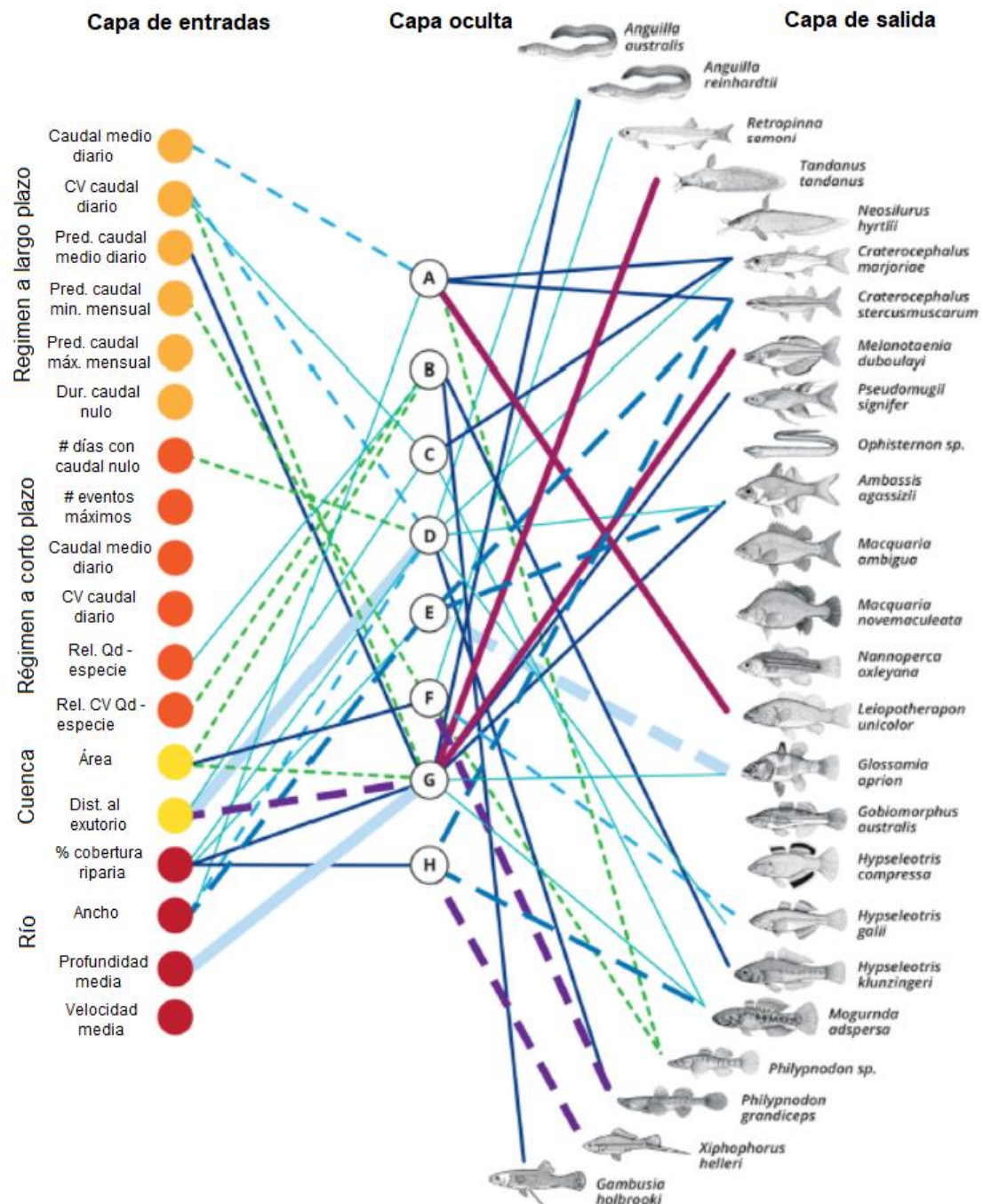


Figura 7.4 Red neuronal para predecir respuestas de especies de peces. Fuente: Kennard et al. (2007).

7.2.5. Redes Bayesianas

Las redes Bayesianas son modelos probabilísticos gráficos que vinculan las salidas por medio de una serie de tablas de probabilidad condicional (TPC; [Pearl, 2000](#)). Estos métodos presentan varias ventajas frente a otros modelos estadísticos: i) son fáciles de construir; ii) su base es explícitamente un modelo conceptual gráfico que muestra como las variables de entrada interactúan para afectar al resultado final; iii) La naturaleza estocástica de las relaciones recae en las TPCs y se propaga por toda la red para generar una incertidumbre como resultado adicional y vi) pueden ser empleadas para analizar rápidamente las relaciones más probables entre el hábitat y las variables de entrada ([Horne et al., 2017](#)).

Estos métodos se han aplicado para construir modelos de respuesta hidrológica a los cambios en el régimen para el timalo (*Prototroctes maraena*) y el pez negro (*Gadopsis marmoratus*) en dos ríos del sureste de Australia ([Shenton, Hart y Chan, 2011](#); [Shenton et al., 2013](#)). Los modelos se construyeron mediante consulta de expertos para seleccionar los procesos probables que explicarían los efectos de la variabilidad hidrológica.

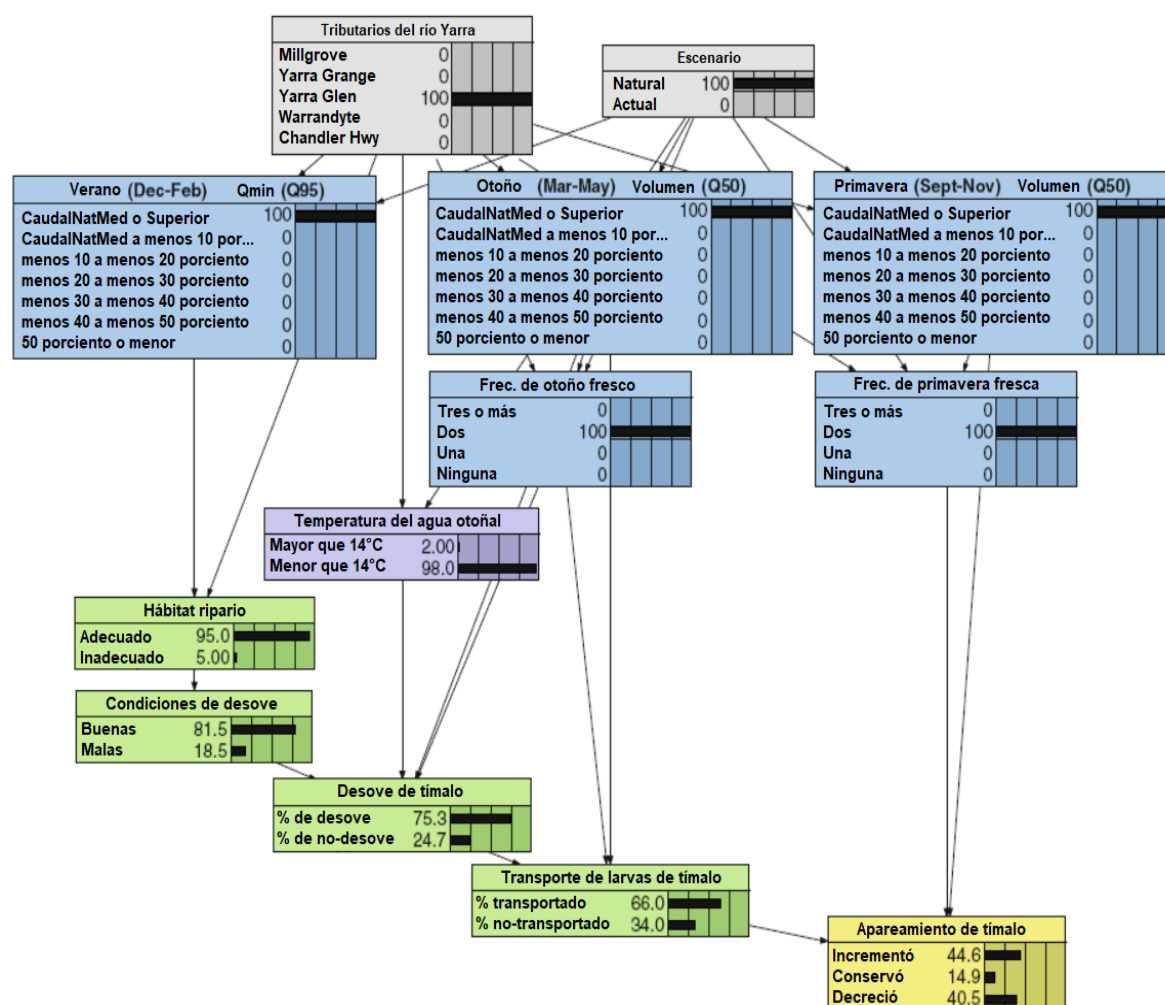


Figura 7.5 Red Bayesiana para predecir las respuestas del timalo (*Prototroctes maraena*) en el río Yarra, Australia. Fuente: adaptada de [Shenton et al. \(2013\)](#).

7.2.6. Diversidad de especies

El planeta Tierra alberga una gran diversidad de especies en sus aguas y zonas continentales. Se han identificado, clasificado y nombrado más de 1.4 millones de especies (Tyler y Spoolman, 2015). La Figura 7.6 muestra el número de especies vivas en la actualidad de todos los tipos de organismos conocidos. La información es clasificada por los principales grupos taxonómicos. Se observa que las plantas y los insectos dominan de diversidad de los seres vivos. Sin embargo, esta diversidad no ha sido constante en el tiempo ni en el espacio.

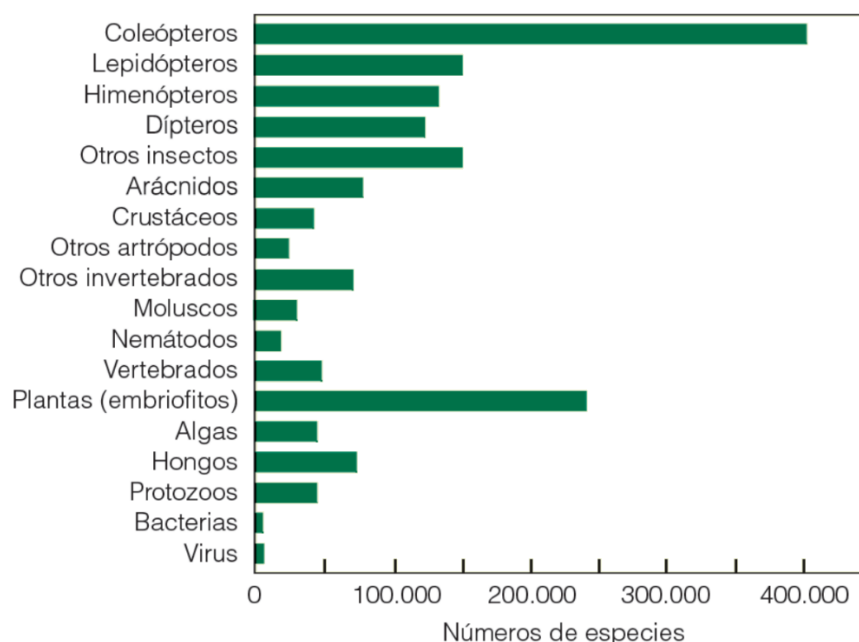


Figura 7.6 Número de especies vivas actuales clasificadas por los principales grupos taxonómicos.
Fuente: Smith y Smith (2007).

Existen diferentes patrones geográficos de diversidad que son vinculados con las condiciones ambientales y la capacidad del hábitat local de mantener la vida. Dichos patrones locales, reflejan cambios en la distribución y abundancia de las especies en el tiempo. Por ejemplo, la evolución de la diversidad en plantas vasculares terrestres presenta un incremento casi permanente en el tiempo, aunque los grupos predominantes han cambiado de manera notable.

Aunque la historia de diversidad de la Tierra muestra un incremento en la riqueza de especies, ha habido periodos de declive (Figura 7.7). Esta historia ha mantenido una dinámica donde nacen nuevas especies y otras se extinguen. Esta dinámica ha estado presente desde que los organismos vivos aparecieron. Por otro lado, los periodos de declive han producido extinciones masivas, pero no totales. Las especies sobrevivientes se adaptan al cambio y transfieren su información genética a las futuras generaciones por medio de la reproducción. Sin embargo, la mayoría de las extinciones actuales se han producido a partir del año 1600 y se atribuye el 75% de la pérdida de diversidad a los humanos (Tyler y Spoolman, 2015).

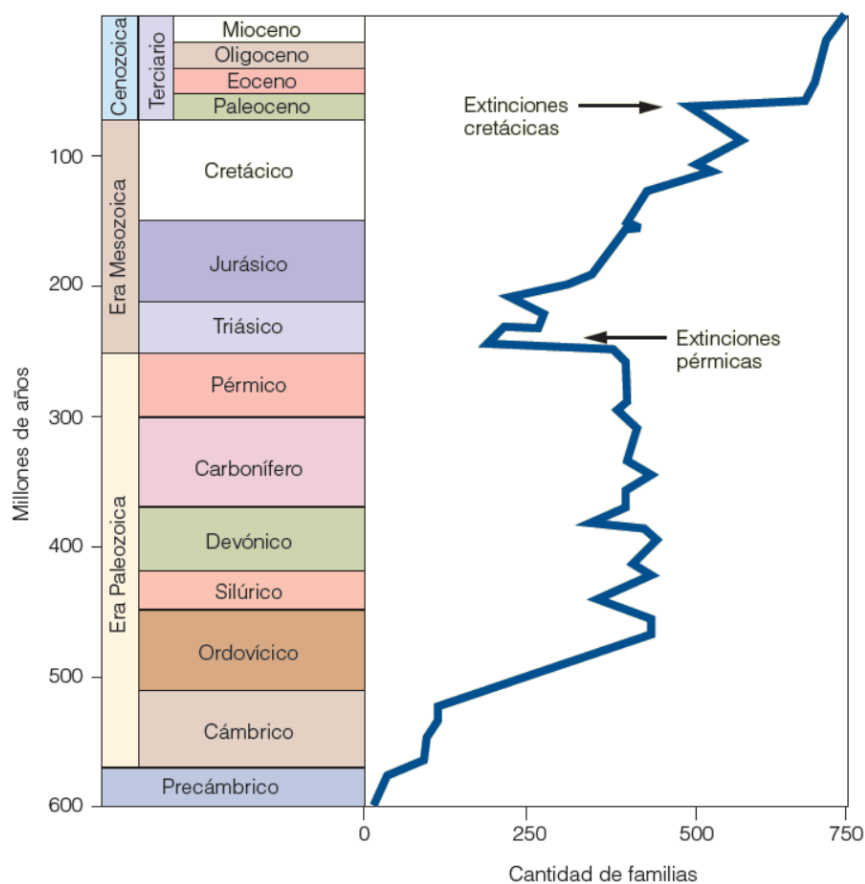


Figura 7.7 Escala de tiempo geológica y extinciones masivas en la historia de la vida.

Los patrones geográficos marcan una tendencia clara en la distribución general de la diversidad. En términos generales, la cantidad de especies terrestres (riqueza) disminuye con el desplazamiento latitudinal del Ecuador hacia los polos (Figura 7.8). Sin embargo, en el caso de los ecosistemas marinos, el patrón de latitud es inverso al de los ecosistemas terrestres (Figura 7.9).

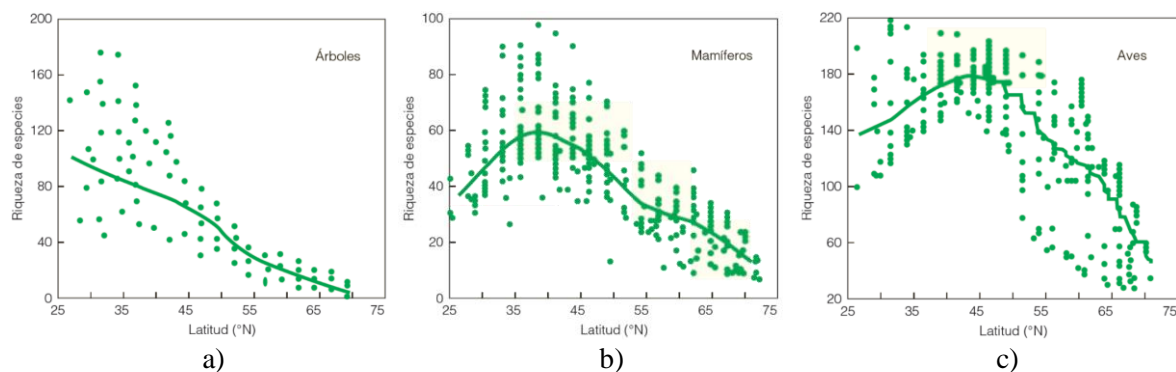


Figura 7.8 Variación de la riqueza de especies terrestres en función de la latitud: a) árboles; b) mamíferos y c) aves. Fuente: [Smith y Smith \(2007\)](#).

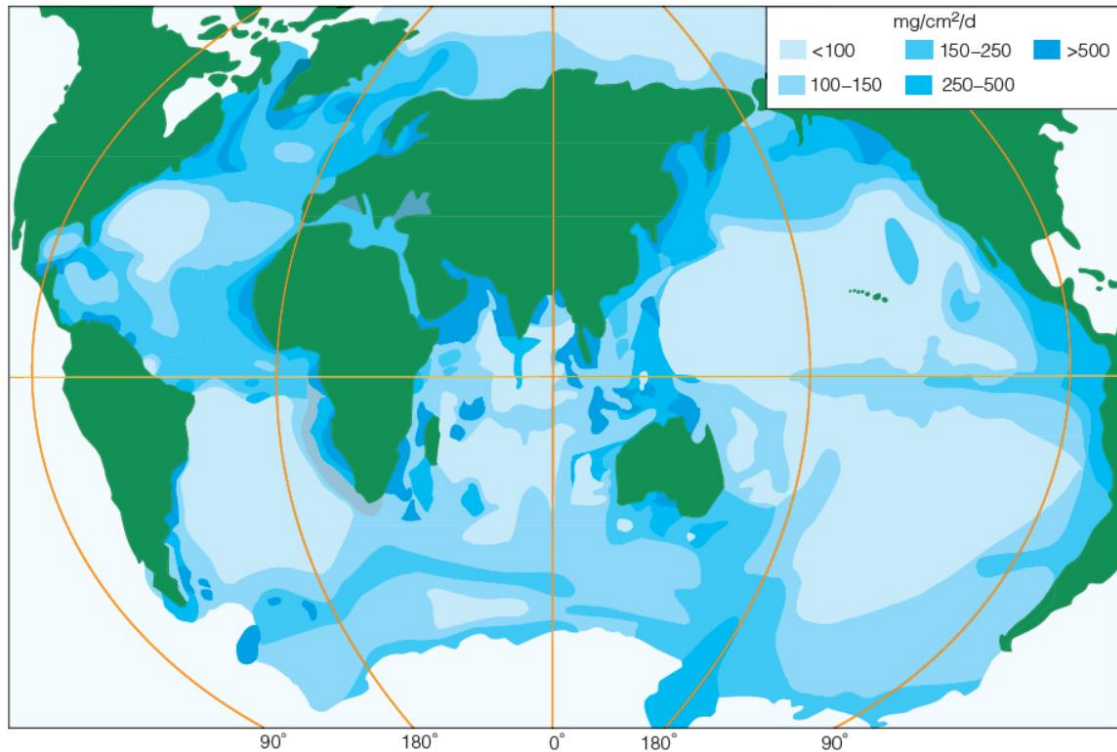


Figura 7.9 Producción primaria de ecosistemas marinos. Fuente: [Smith y Smith \(2007\)](#).

Esta distribución general está fuertemente marcada a características ambientales como el clima y la disponibilidad de recursos esenciales que afectan al crecimiento poblacional de animales y plantas. La Figura 7.10 muestra la producción primaria de materia orgánica seca, en función de la temperatura media anual y la precipitación media anual, y que forma la fuente primaria de los procesos de descomposición en ecosistemas terrestres y acuáticos ([Tyler y Spoolman, 2015](#)).

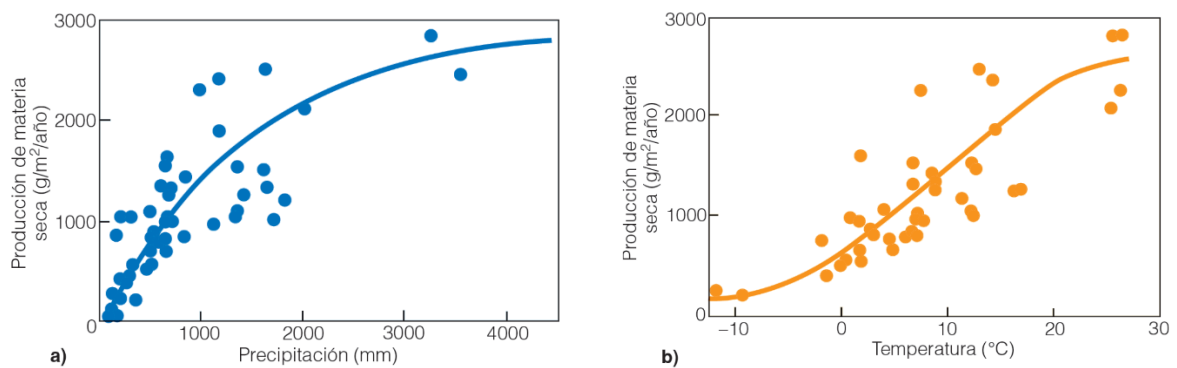


Figura 7.10 Producción primaria neta de varios ecosistemas terrestres en función de variables climáticas: a) precipitación media anual y b) temperatura media anual. Fuente: [Smith y Smith \(2007\)](#).

Si bien, la riqueza y variación de especies se vincula con factores climáticos como temperatura anual, radiación solar y precipitación, su relación es más estrecha con la evapotranspiración de referencia (ET_o; [Currie, 1991](#)). A su vez, la ET_o está correlacionada con la temperatura, la radiación solar, la precipitación, la humedad y un conjunto de otros factores abióticos que varían con la latitud. Adicionalmente, la ET_o también está correlacionada con la producción vegetal de una determinada región. Por otro lado, la diversidad animal se vincula con la diversidad vegetal ya que la riqueza de especies vegetales proporciona una variedad de fuentes alimentarias potenciales, así como un hábitat adecuado para los animales. En consecuencia, la variedad vegetal mantiene la variedad animal ([Smith y Smith, 2007](#)).

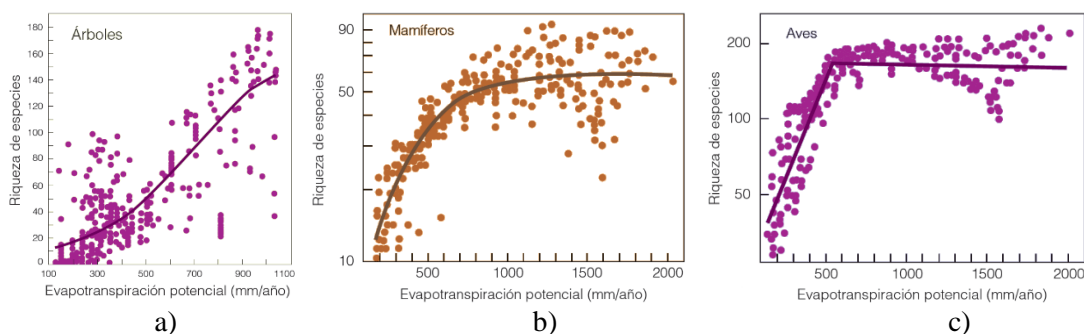


Figura 7.11 Variación de la riqueza de especies terrestres en función de la ETR: a) árboles; b) mamíferos y c) aves. Fuente: adaptadas de [Currie \(1991\)](#).

La topografía también juega un aspecto importante para la distribución de las especies. Las regiones montañosas, por lo general, mantienen una mayor cantidad de especies que un terreno consistente en llanuras. Sin embargo, las montañas simbolizan un área menor que las praderas y llanuras por lo que, a pesar de albergar más especies, éstas se encuentran localizadas en un área pequeña. Su proporción, en comparación con la riqueza de llanuras, es menor.

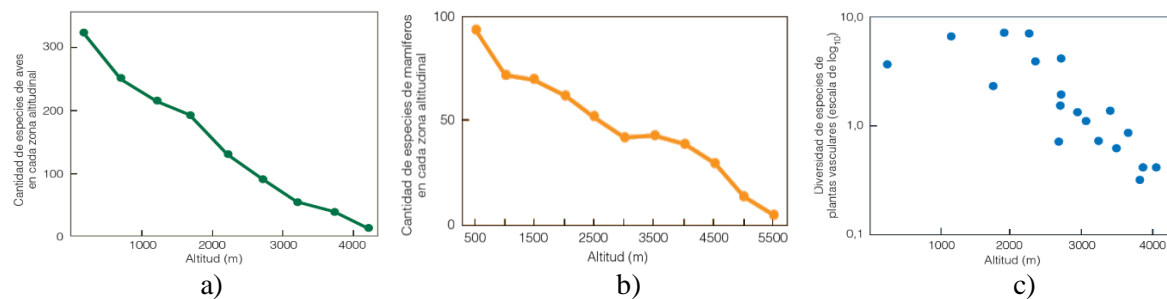


Figura 7.12 Variación de la riqueza de especies terrestres en función de la altitud: a) aves; b) mamíferos y c) plantas vasculares. Fuente: adaptadas de [Smith y Smith \(2007\)](#).

Dado que la diversidad está correlacionada con diversos factores bióticos y abióticos, es clasificada en tres grupos:

- Diversidad alfa (D_α): es la riqueza de especies de un área local, en donde a mayor área, mayor riqueza.
- Diversidad beta (D_β): es una medida del recambio de especies entre una región a otra.
- Diversidad gama (D_γ): es la riqueza de especies de un conjunto de comunidades que integran un paisaje. Este grupo engloba la diversidad alfa y beta.

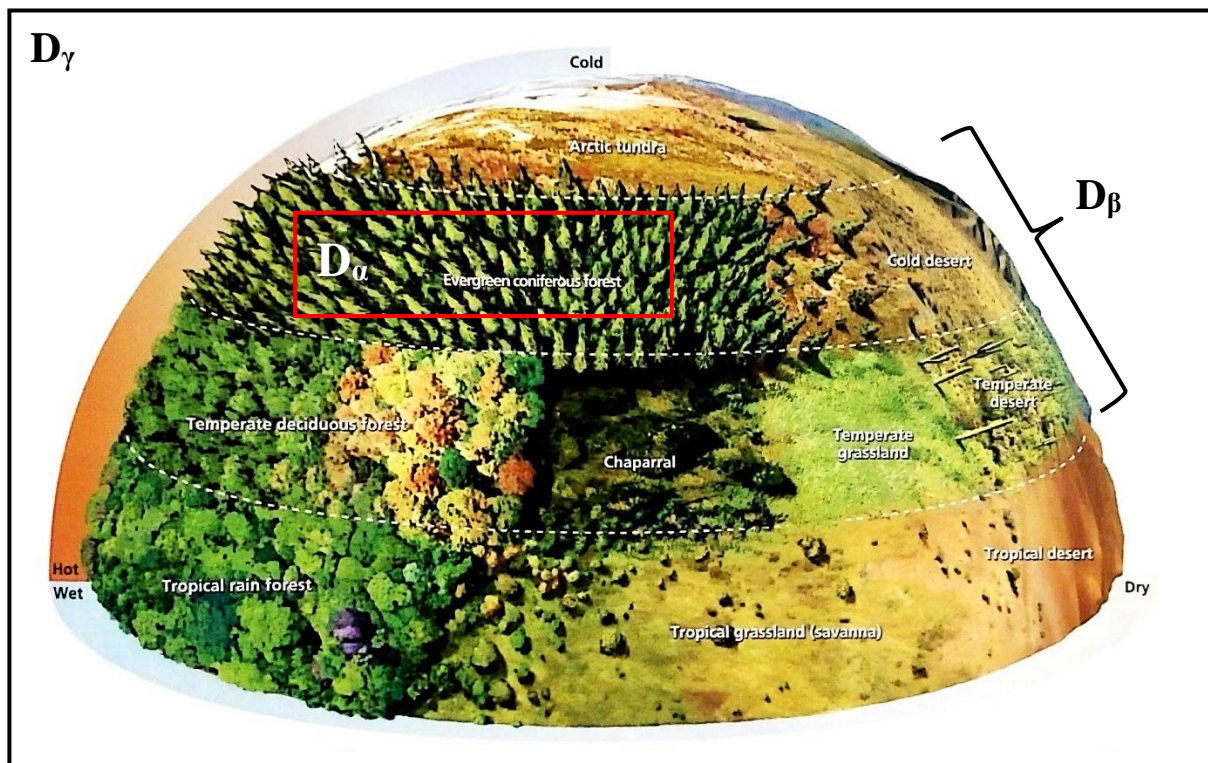


Figura 7.13 Representación gráfica de diversidad alfa (α), beta (β) y gama (γ). Fuente: adaptada de Tyler y Spoolman (2015).

7.3. Análisis de diversidad alfa en México

Los métodos estadísticos para predecir las respuestas hábitat-caudal-sociedad han mostrado resultados satisfactorios en los sitios donde se han aplicado. Sin embargo, algunos de ellos requieren una cantidad abundante de información multivariable. La información biológica e hidráulica suele ser obtenida por medio de trabajo de campo, o bien, consultando bases de datos y/o bibliografía donde se encuentre reportada. En el marco de la presente investigación, se aborda el problema biológico desde una perspectiva más global y regional: estimando la diversidad alfa de especies de mamíferos, plantas, reptiles y aves. Su aplicación resulta conveniente para el método regional y semi-holístico abordado en la presente investigación.

7.3.1. Materiales y método

Los datos para el análisis de diversidad alfa en México se retomaron de las bases de datos de la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) a través de la lista *Red List* (IUCN, 2017). La información está compuesta por una rica colección de distribución potencial recopilada para todo el mundo. Esta información está organizada en archivos vectoriales de formato shape (*.shp) y sus principales atributos son: i) nombre científico; ii) año de documentación; iii) condición de residencia; iv) reino; v) filo; vi) clase; vii) orden; viii) familia; ix) género; x) código; xi) perímetro y xii) área. El IUCN clasifica las especies en nueve clases (Figura 7.14). De la gama de atributos que conforman la base de datos, el principal de ellos es el código, ya que éste refleja la clasificación en la que cae cada especie.

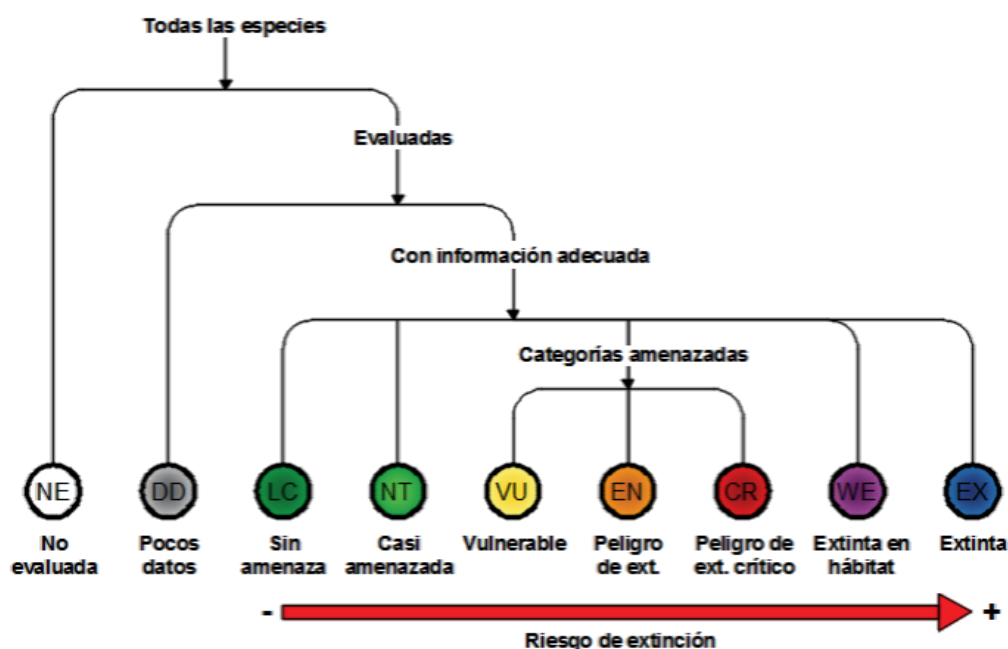


Figura 7.14 Clasificación de vulnerabilidad de especies según IUCN. Fuente: adaptada IUCN (2017).

Para México, se cuenta con información para especies de anfibios, mamíferos y reptiles. Sin embargo, su contenido es casi nulo para especies de peces y aves. La Figura 7.15 muestra la distribución potencial de la *Red List* para anfibios. Cada polígono representa la distribución potencial de alguna especie. Los polígonos se traslapan cuando dos especies se localizan en la misma zona geográfica. Estas capas de datos son empleadas para estimar la bioviversidad alfa (B_α) como la riqueza (número de especies) en cada píxel.

7.3.2. Resultados

La B_α se estimó para especies de reptiles, anfibios y mamíferos para las clases sin amenaza (LC), casi amenazada (NT), vulnerable (VU), en peligro de extinción (EN) y en peligro de extinción crítico (CR) de la *Red List*. Los resultados obtenidos se describen de forma sucinta

en los siguientes párrafos. Cabe mencionar que sólo se describen las clases para las cuales fue posible obtener resultados.

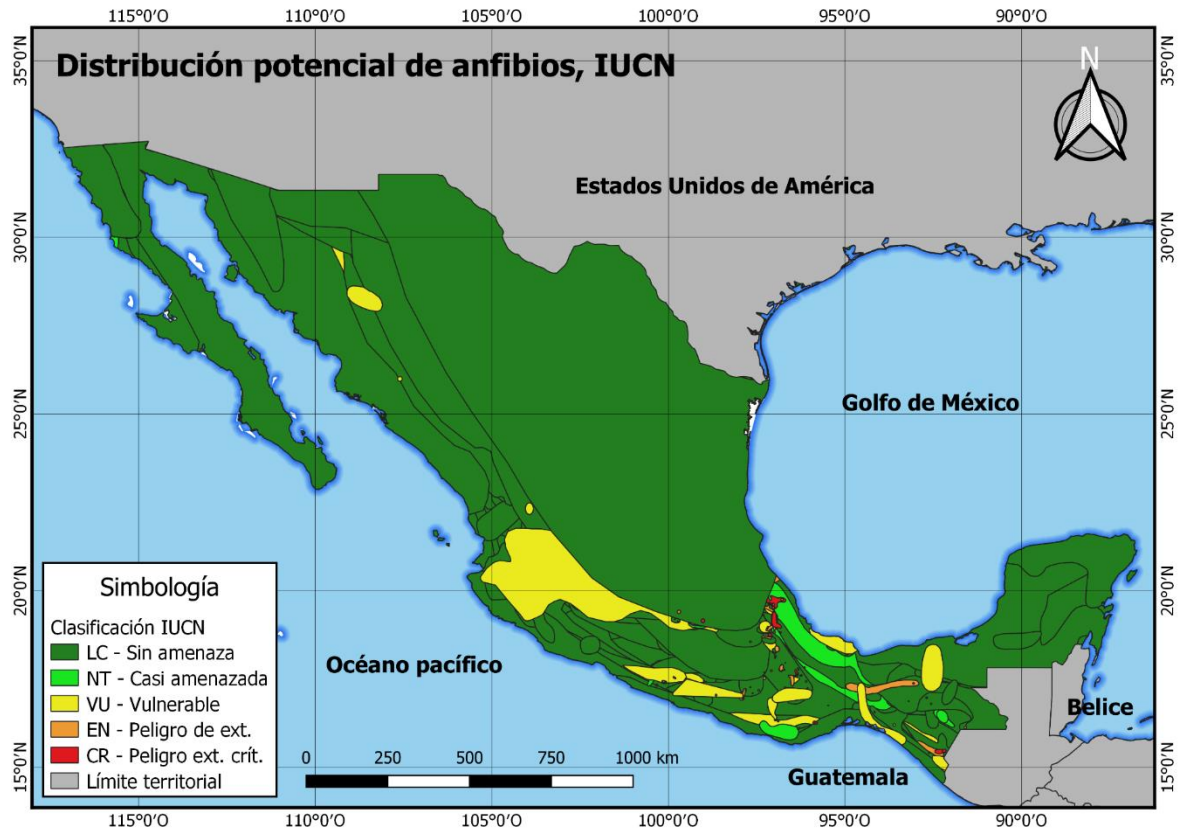


Figura 7.15 Distribución potencial de anfibios de *Red List*. Fuente: [IUCN, 2017](#).

Diversidad alfa de especies

Los anfibios muestran una preferencia por lugares con baja altitud y cálidos, pero se concentran, principalmente, en las zonas perimetrales de México (Figura 7.17). Existen algunas especies de sapos, ranas y salamandras que prefieren lugares húmedos y cercanos a las costas mexicanas (e.g: *Rhinophrynus dorsalis*, *Bolitoglossa rufescens*, *Bolitoglossa yucatana* etc.). También hay especies que potencialmente se pueden localizar a lo largo del país (e.g: *Lithobates berlandieri*, *Spea multiplicata*, *Craugastor augusti*, etc.) y algunas otras en el altiplano mexicano (e.g: *Ambystoma tigrinum*, *Ambystoma velasci*, *Ambystoma mavortium*, etc.).

La distribución potencial de los mamíferos se presenta en casi todo el territorio nacional para condiciones casi amenazadas (Figura 7.17). Sin embargo, su distribución potencial para condiciones vulnerables se concentra en las costas de las Sierras Madres Occidental y Oriental. Las siguientes especies endémicas de México se encuentran en condiciones de vulnerabilidad:

murciélago magueyero menor (*Leptonycteris yerbabuenae*), musaraña de Sierra del Carmen (*Sorex milleri*), musaraña gris de Villa (*Notiosorex villai*), murciélago platanero (*Musonycteris harrisoni*), musaraña de la Sierra Madre Oriental (*Cryptotis obscura*), musaraña dientuda (*Sorex macrodon*), musaraña orejillas mayor (*Cryptotis magna*), murciélago de saco del sureste (*Balantiopteryx io*), corzuela de Yucatán (*Mazama pandora*), zorrillo pigmeo (*Spilogale pygmaea*), murciélago amarillo del infiernillo (*Rhogeessa mira*), chichimocos (*Tamias bulleri*), ratón de abazones de Baja California (*Chaetodipus dalquesti*).

Por otro lado, la distribución potencial de reptiles es la más abundante en la base de datos del IUCN (Figura 7.18). Su distribución de especies en vulnerabilidad se asemeja a la presentada en los mamíferos. Sin embargo, en este grupo de especies se cuenta con información de algunas en peligro de extinción: culebra de agua nómada mexicana (*Thamnophis melanogaster*), lagartijas endémicas de La Laguna (*Sceloporus cyanostictus*), lagartija perrilla de arena (*Uma exsul*), dragoncitos (*Abronia deppii* y *Abronia fuscolabialis*), víbora torito mexicano (*Mixcoatlus melanurus*), culebritas de collar (*Tantilla flavilineata*), lagartija del centro de México (*Barisia herrerae*), lagartija sin patas en Veracruz (*Ophisaurus ceroni*), cascabel de Tancitaro (*Crotalus pusillus*) y abaniquillos (*Anolis pygmaeus* y *Anolis hobartsmithi*). Cabe resaltar que estas dos especies endémicas se encuentran localizadas, principalmente, en la cuenca del río Lerma-Chapala-Santiago.

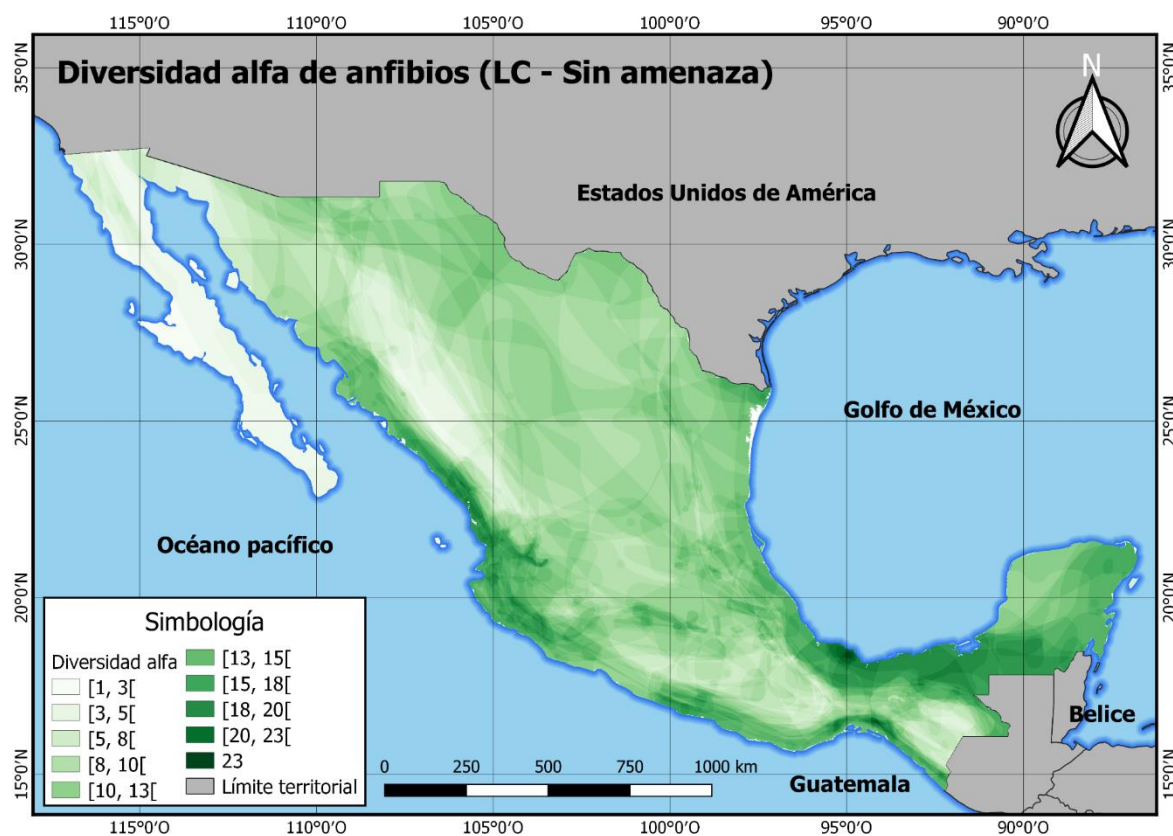


Figura 7.16 Diversidad alfa de anfibios, clase LC – sin amenaza.

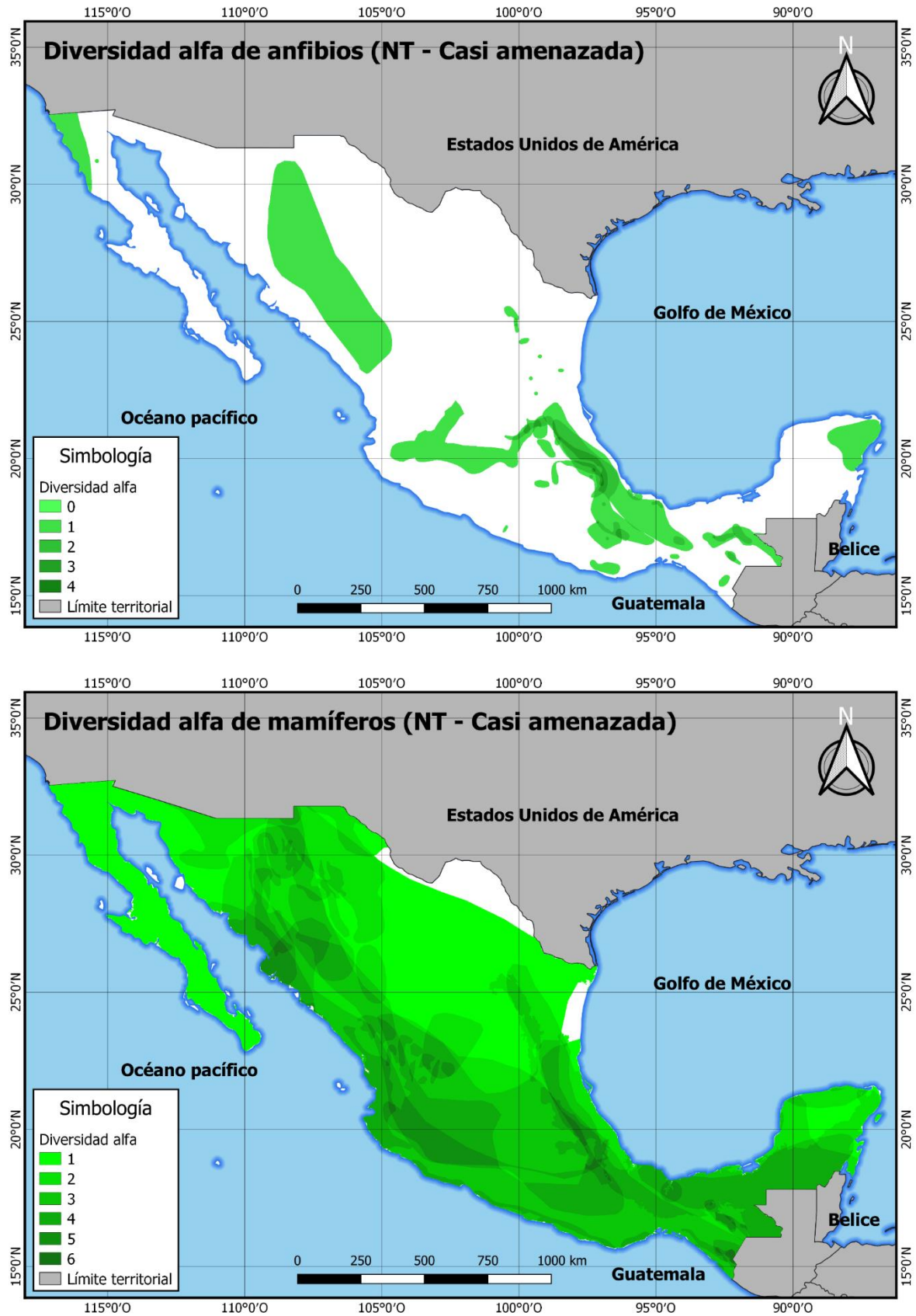


Figura 7.17 Diversidad alfa de anfibios y mamíferos, clase NT – casi amenazada

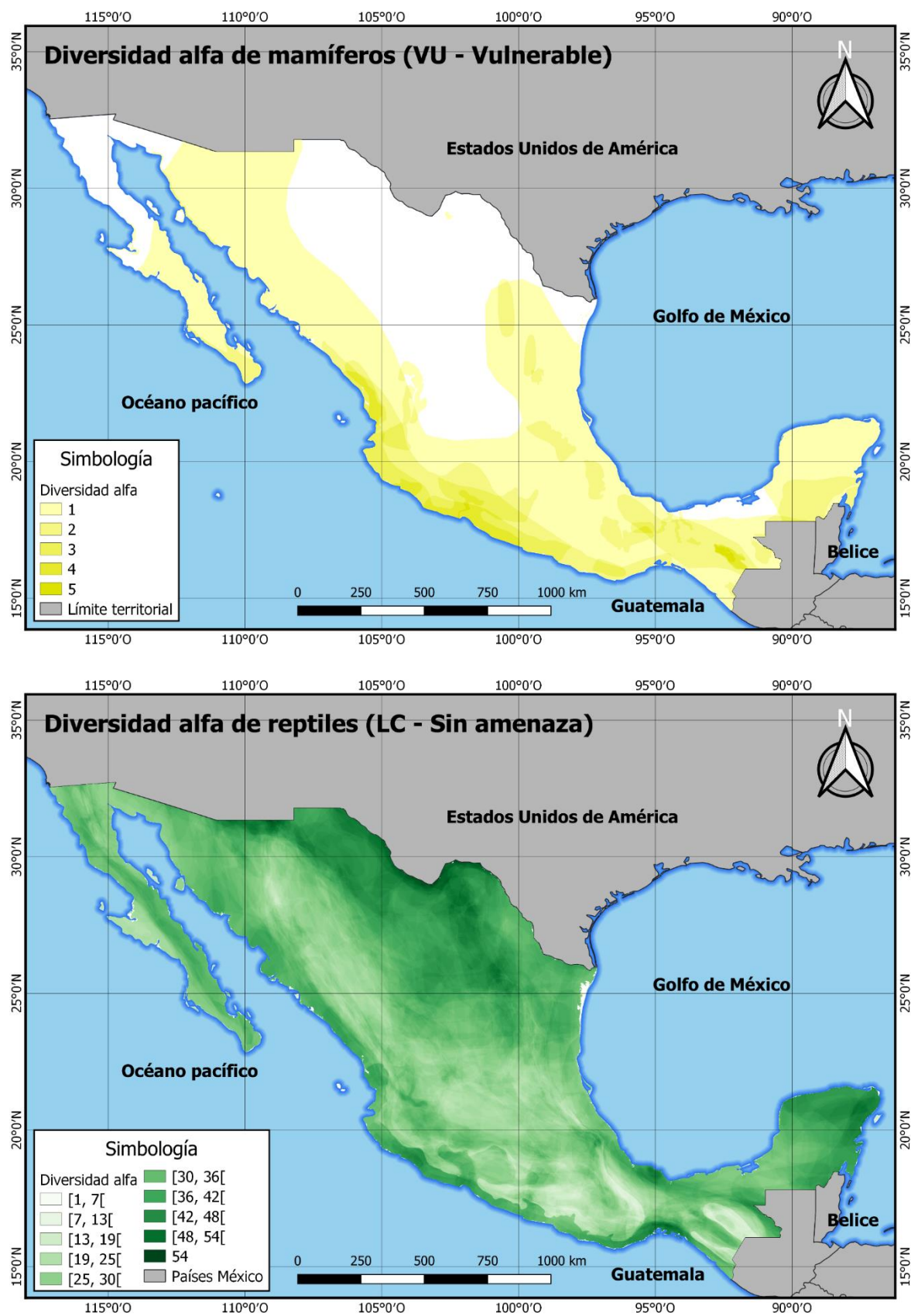


Figura 7.18 Diversidad alfa de mamíferos clase VU – vulnerable y reptiles clase LC – sin amenaza.

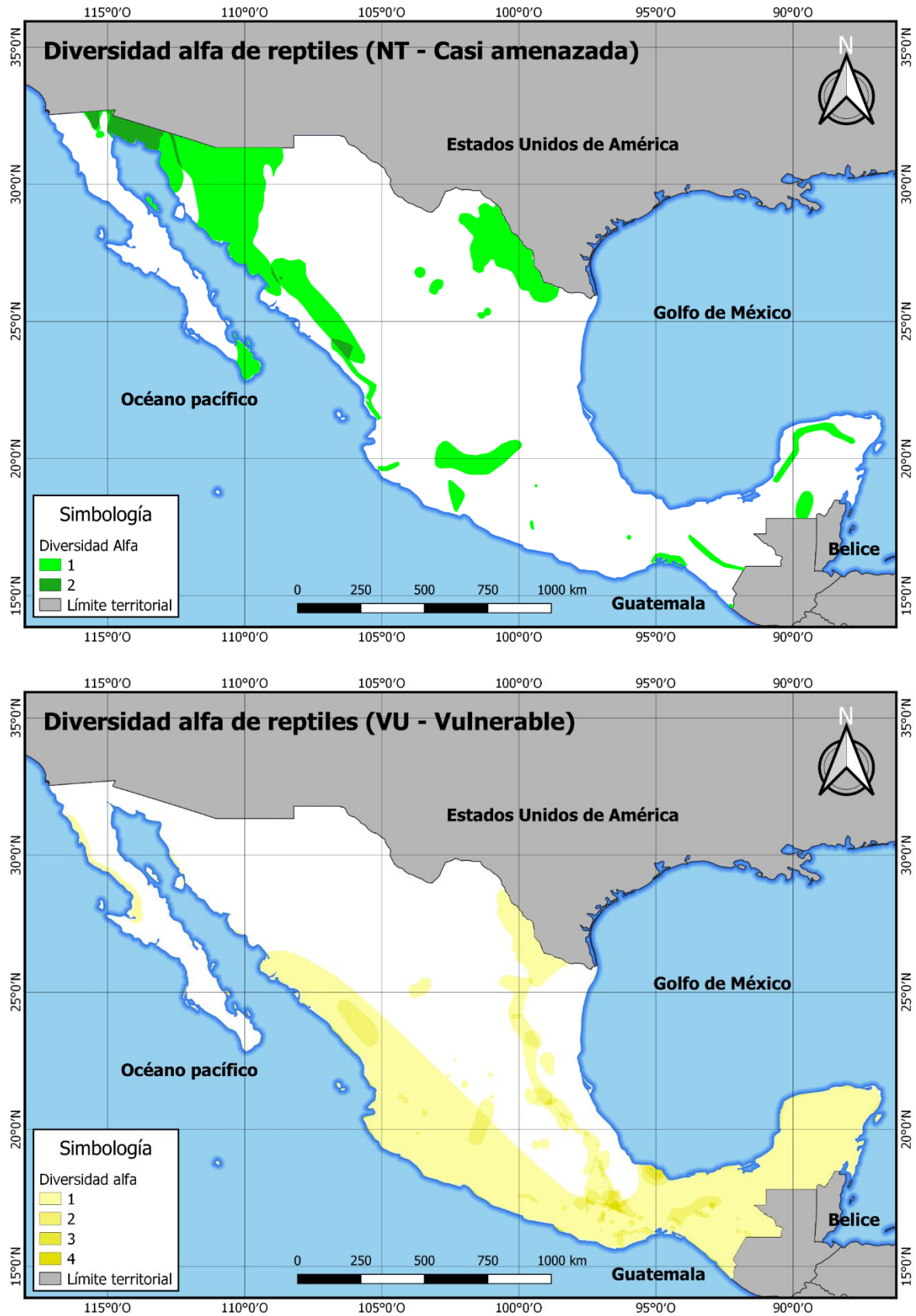


Figura 7.19 Diversidad alfa de reptiles, clases NT – casi amenazada y VU - Vulnerable.

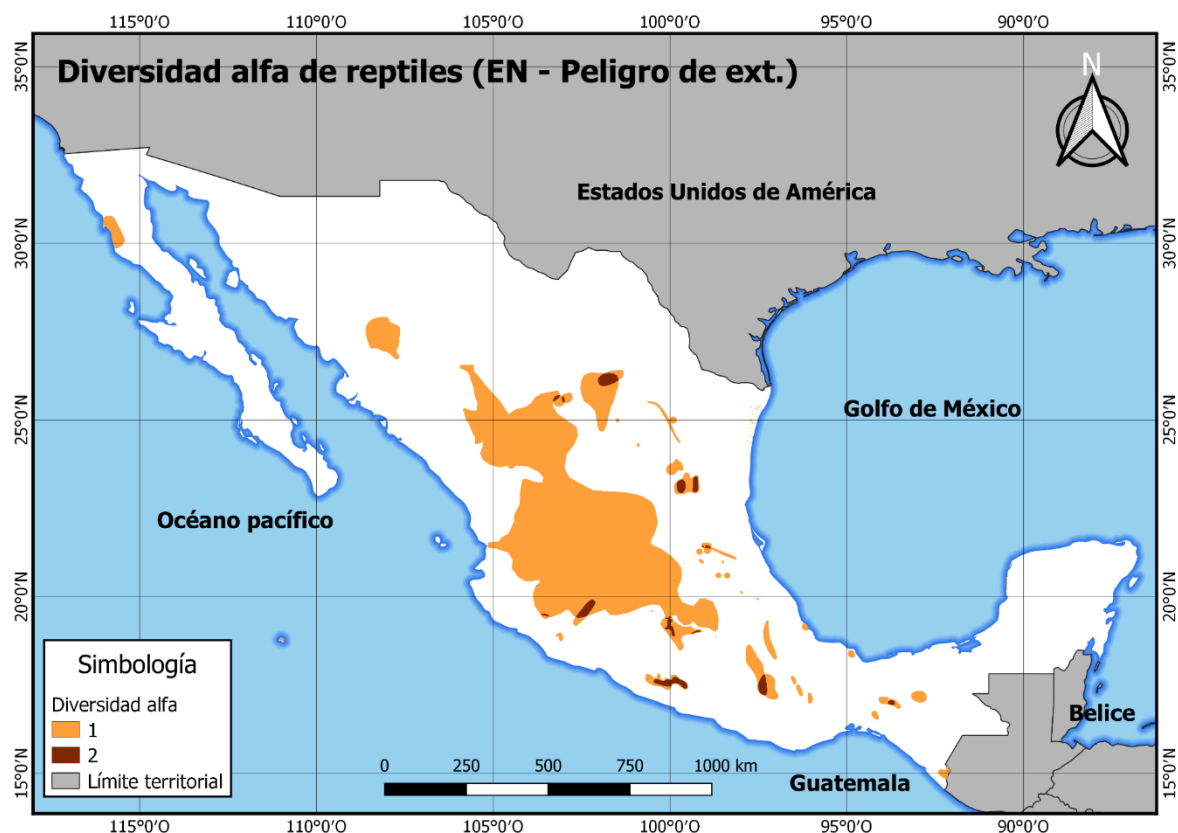


Figura 7.20 Diversidad alfa de reptiles clase EN – peligro de extinción.

Análisis geográfico

Las condiciones geográficas de una cierta región están estrechamente vinculadas con la distribución general de las especies. Con la B_α se pretendió encontrar relaciones generales entre la distribución potencial de las especies y las variables consideradas dentro del marco de la presente investigación. Por tal razón, se realizó un análisis geográfico para parametrizar su presencia/ausencia por variaciones de latitud, longitud y altitud. Cabe recordar que las variaciones geográficas también fueron empleadas para interpolar variables climáticas de temperatura y precipitación (Capítulo 5).

El análisis geográfico consistió en filtrar las imágenes de B_α (Figura 7.21 a Figura 7.23) bajo el criterio $B_\alpha > 0$ y sobreponer el filtro en un DEM. Cada píxel filtrado se asocia con una longitud, latitud y altitud. El filtro está compuesto por una cantidad abundante de información que genera una nube de dispersión densa en las gráficas. Con fines de disminuir la densidad, se realizó un muestreo aleatorio del 25% de la población total y se ajustaron diversos modelos a los datos de la muestra a través del *toolbox curvefit* de Matlab (ver datos de ajuste en Tabla 7.1). Estos ajustes muestran los patrones generales de la distribución geográfica de los tres grupos de especies analizados.

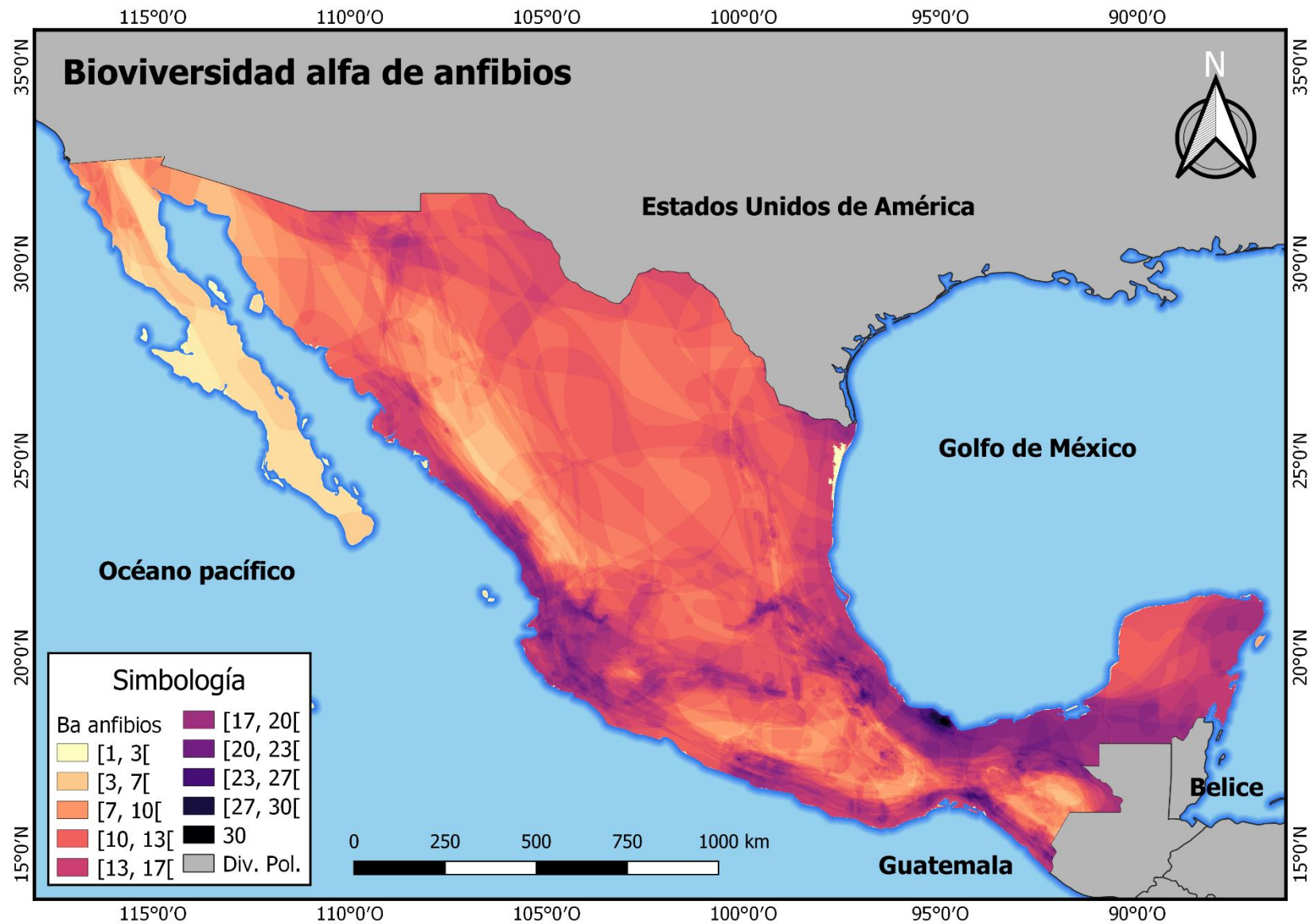


Figura 7.21 Mapa de diversidad alfa de especies de anfibios en México.

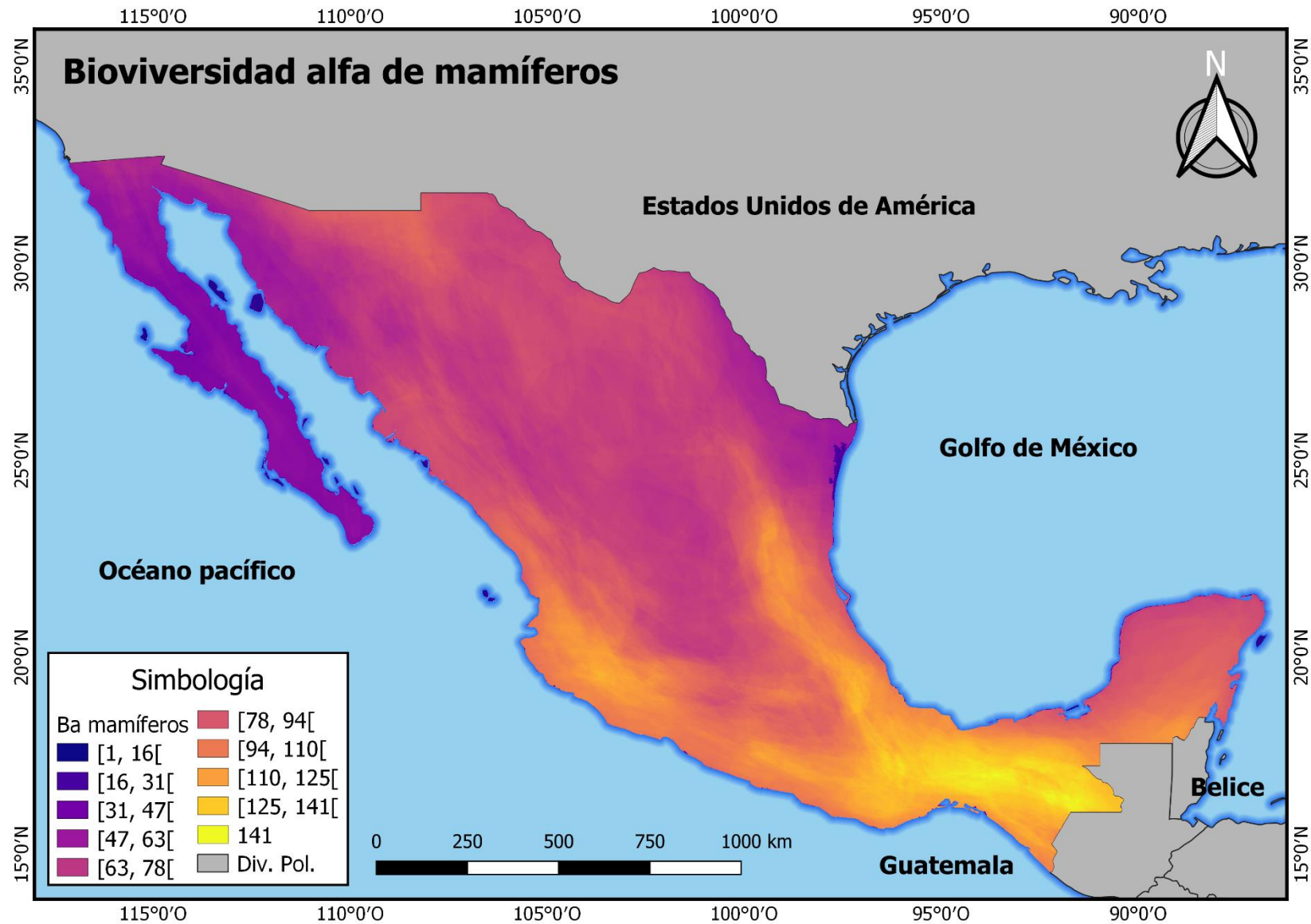


Figura 7.22 Mapa de diversidad alfa de especies de mamíferos en México.

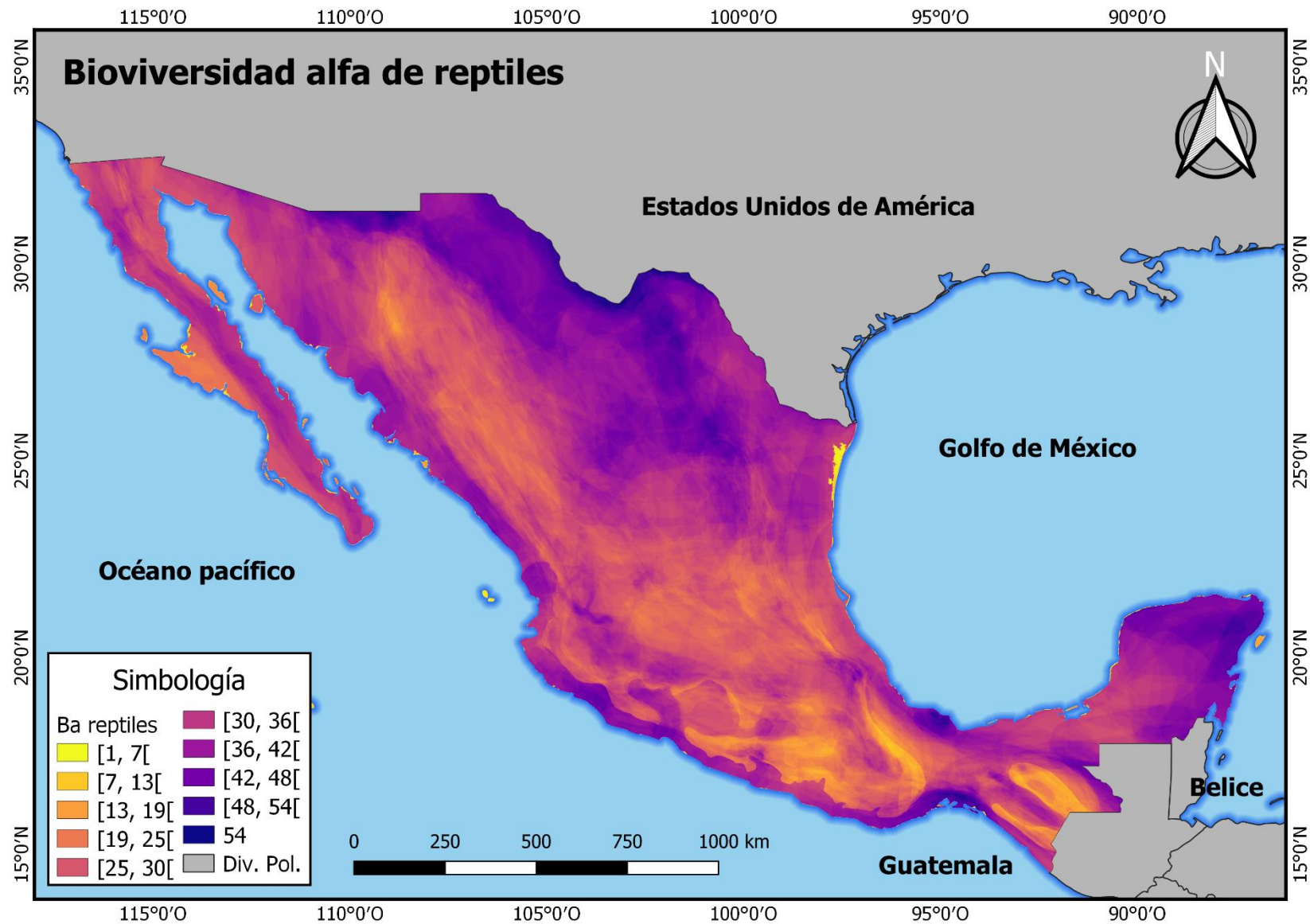


Figura 7.23 Mapa de diversidad alfa de especies de reptiles en México.

La distribución de anfibios, con respecto a su longitud, muestra un incremento en la costa del Atlántico comparada con la del Pacífico (Figura 7.24). Es decir, muestran preferencias por lugares cálido-húmedos (Figura 6.27 y Figura 6.39). Con respecto a la latitud, se muestra una mayor concentración en el sur de México; a medida que la latitud varía hacia el norte, el número de anfibios decrece al igual que la precipitación. En cuanto a la altitud, se observó un comportamiento interesante. En efecto, los niveles de B_{α} elevados en bajas altitudes muestra la distribución en las zonas costeras (por encima del ajuste polinomial en la Figura 7.24). Sin embargo, los bajos niveles a bajas altitudes refleja las condiciones del altiplano mexicano (por debajo del ajuste polinomial en la Figura 7.24). Independientemente de su localización, las especies de anfibios tienden a disminuir con el incremento de la altitud donde las temperaturas dejan de ser cálidas.

Los mamíferos muestran un comportamiento sinusoidal con máximos locales en las longitudes 116° O y 95° O aproximadamente, es decir, muestran una mayor distribución en lugares cálido-húmedos (Figura 7.24). Sin embargo, su riqueza disminuye a medida que la latitud varía hacia el norte de México. Respecto a la altitud, se observa un fenómeno similar al de los anfibios, pero con pendiente positiva. Su presencia en diversas altitudes refleja una mayor riqueza en diferentes gradientes de altitud, o bien, una mayor plasticidad a variaciones geográficas y de clima.

Por otro lado, la B_{α} de reptiles se concentra en longitudes centrales de la república mexicana, así como en la costa del Atlántico (Figura 7.24). Con respecto a la latitud, su concentración está dividida en dos grupos importantes: i) reptiles con preferencias a climas cálido-húmedos y ii) reptiles con preferencias a climas semi-secos. Sin embargo, la riqueza de ambos grupos de reptiles disminuye con el incremento del gradiente de altitud donde la temperatura disminuye.

Análisis climático

El clima es uno de los componentes que mejor describe parámetros de distribución, crecimiento y comportamiento de las comunidades de especies en el hábitat (sección 7.2.6). Por ello, se realiza un análisis climático para relacionar la presencia/ausencia a causa de variaciones en temperatura y precipitación y efectos potenciales a causa del cambio climático (Capítulo 6). Las bases de datos del IUCN contienen el año en el que la especie fue documentada (sección 7.3.1). Para las especies consideradas en México, el 81.3% fueron documentadas en el año 2008. Por tanto, la relación climática se realiza con imágenes de ese año para reflejar las condiciones del clima en el momento en el que los muestreos fueron efectuados.

El análisis climático consistió en filtrar las imágenes de B_{α} (Figura 7.21 a Figura 7.23) bajo el criterio $B_{\alpha} > 0$ y sobreponer el filtro en imágenes de temperatura media anual y precipitación total del año 2008. Cada píxel filtrado se asocia con una magnitud de precipitación y temperatura.

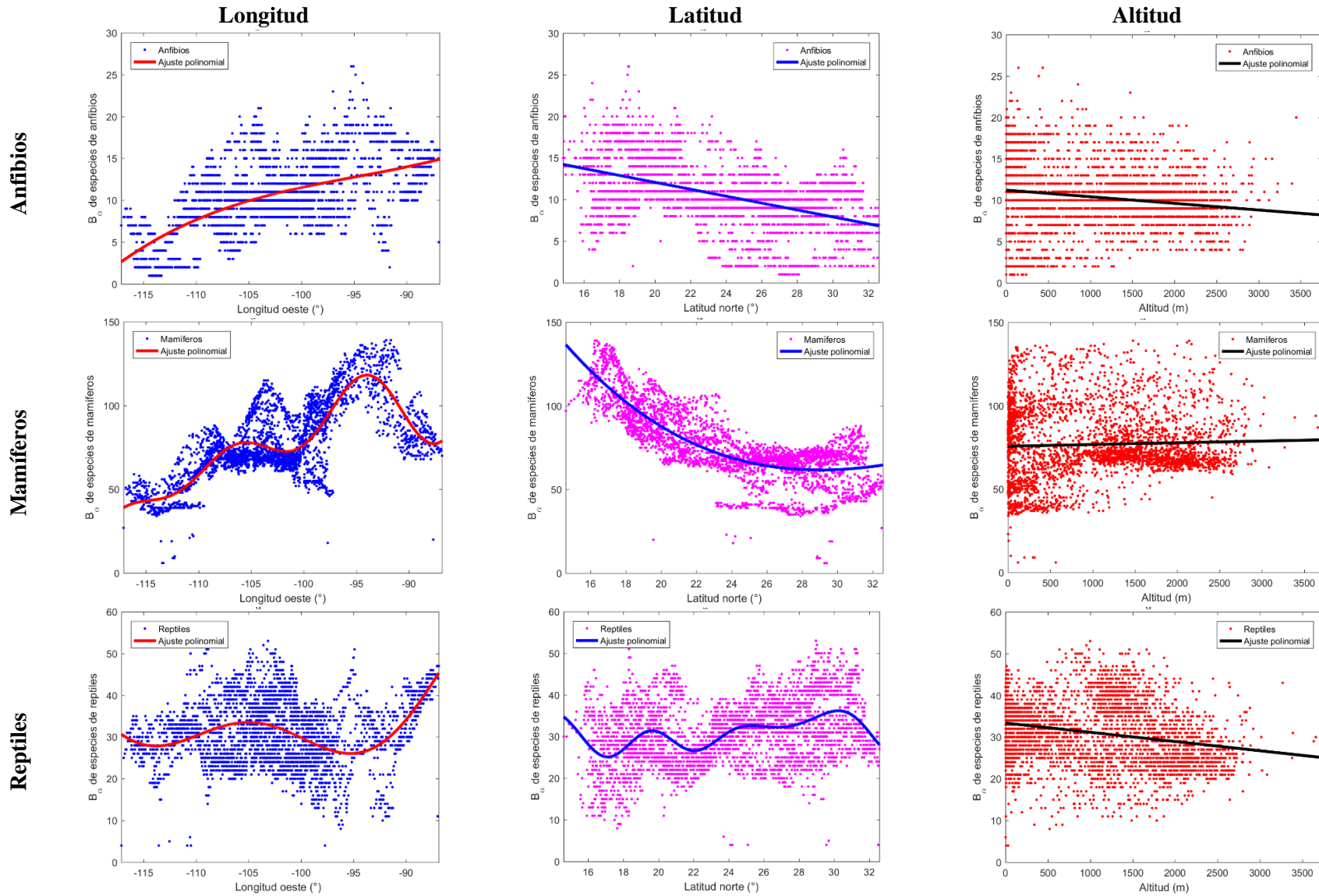


Figura 7.24 Correlaciones geográficas de latitud, longitud y altitud con la B_{α} de anfibios, mamíferos y reptiles.

Con fines de disminuir la densidad de dispersión, se realizó un muestreo aleatorio del 25% de la población total y se ajustaron diversos modelos a los datos de la muestra por medio del *toolbox curvefit* de Matlab (ver datos de ajuste en Tabla 7.1). Estos ajustes muestran los patrones generales de la presencia/ausencia de los tres grupos de especies analizados con relación a la temperatura media anual y precipitación media anual.

Del análisis climático se puede observar que tanto las especies de anfibios, mamíferos y reptiles presentan un incremento en su distribución en función de la temperatura (Figura 7.25a, Figura 7.26a y Figura 7.27a). Esto sugiere que las especies de cualquiera de los tres grupos, podría presentar afectaciones por variaciones en la estacionalidad y magnitud de esta variable climática. Es posible que los lugares más vulnerables sean aquellos donde la temperatura máxima o mínima tienen una tendencia significativa negativa (Figura 6.58).

Las diferencias en la precipitación permiten distinguir a los tres grupos de manera notable. Los anfibios y los mamíferos muestran un incremento en su distribución proporcional a la cantidad de lluvia precipitada hasta ciertos umbrales (2500 a 3000 mm de precipitación media anual; Figura 7.25b y Figura 7.26b). Es evidente que existen especies que se distribuyen en lugares más húmedos. Por ejemplo, especies de sapos (familia *Rhinophrynidae*) y cecilias (familia *Dermophiidae*) para anfibios y especies de musarañas (familia *Soricidae*), roedores (familia *Cuniculidae*) y monos (familia *Atelidae*) en mamíferos (Figura 7.25c y Figura 7.26c).

Por otra parte, los reptiles muestran una proporción de su distribución mayor en lugares de baja precipitación (70 a 1700 mm de precipitación media anual; Figura 7.27b). Sin embargo, existen especies de reptiles, sobre todo acuáticos, que se distribuyen en lugares húmedos (3000 a 4500 mm de precipitación media anual; Figura 7.27b). De la Figura 7.27c se observan cuatro grupos mayoritarios de B_α de reptiles: i) especies de serpientes (familia *Colubridae*), víboras (familia *Viperidae*) e iguanas (familia *Crotaphytidae*) cuya distribución se concentra en lugares de baja precipitación (70 – 700 mm) y temperaturas medias anuales del orden entre los 14 °C a los 23 °C; ii) reptiles como lagartijas (familia *Dactyloidae*) y camaleones (familia *Corytophanidae*) cuya distribución se concentra en áreas de precipitación moderada (1500 – 2000 mm) con temperaturas cálidas (25 °C – 29 °C); iii) especies de camaleones (familia *Corytophanidae*), cocodrilos (familia *Crocodylidae*) y víboras (familia *Viperidae*) con distribución en áreas húmedas (3500 – 4100 mm) y temperatura media anual entre los 16 °C a 19 °C y iv) especies de serpientes (familia *Colubridae*) y geckos (familia *Sphaerodactylidae*) con presencia en áreas húmedas (3500 – 4100 mm) y temperatura media anual entre los 24 °C a 28 °C.

Afectación por cambio climático

El análisis climático mostró el estrecho vínculo entre la B_α (riqueza) y el clima de cada región del país. Por tanto, las variaciones en precipitación y temperatura pueden modificar la presencia/ausencia del tipo de especies analizadas. Por ello, se realizó un análisis para identificar posibles afectaciones por cambio climático en cada grupo.

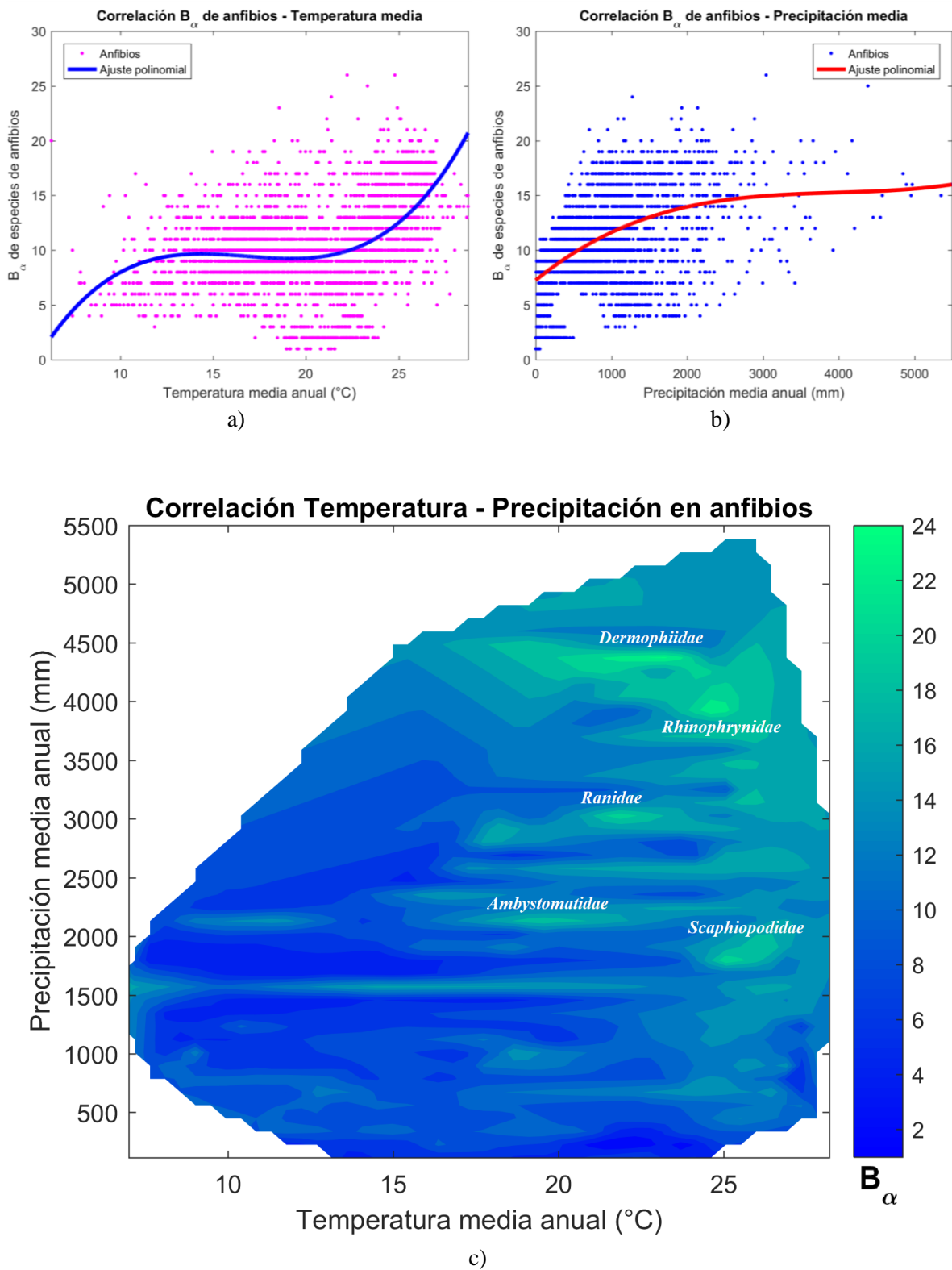


Figura 7.25 Correlación de temperatura media anual (a) y precipitación total anual (b) con anfibios, así como su mapa de distribución en función de la temperatura media anual y precipitación total para el año 2008 (c).

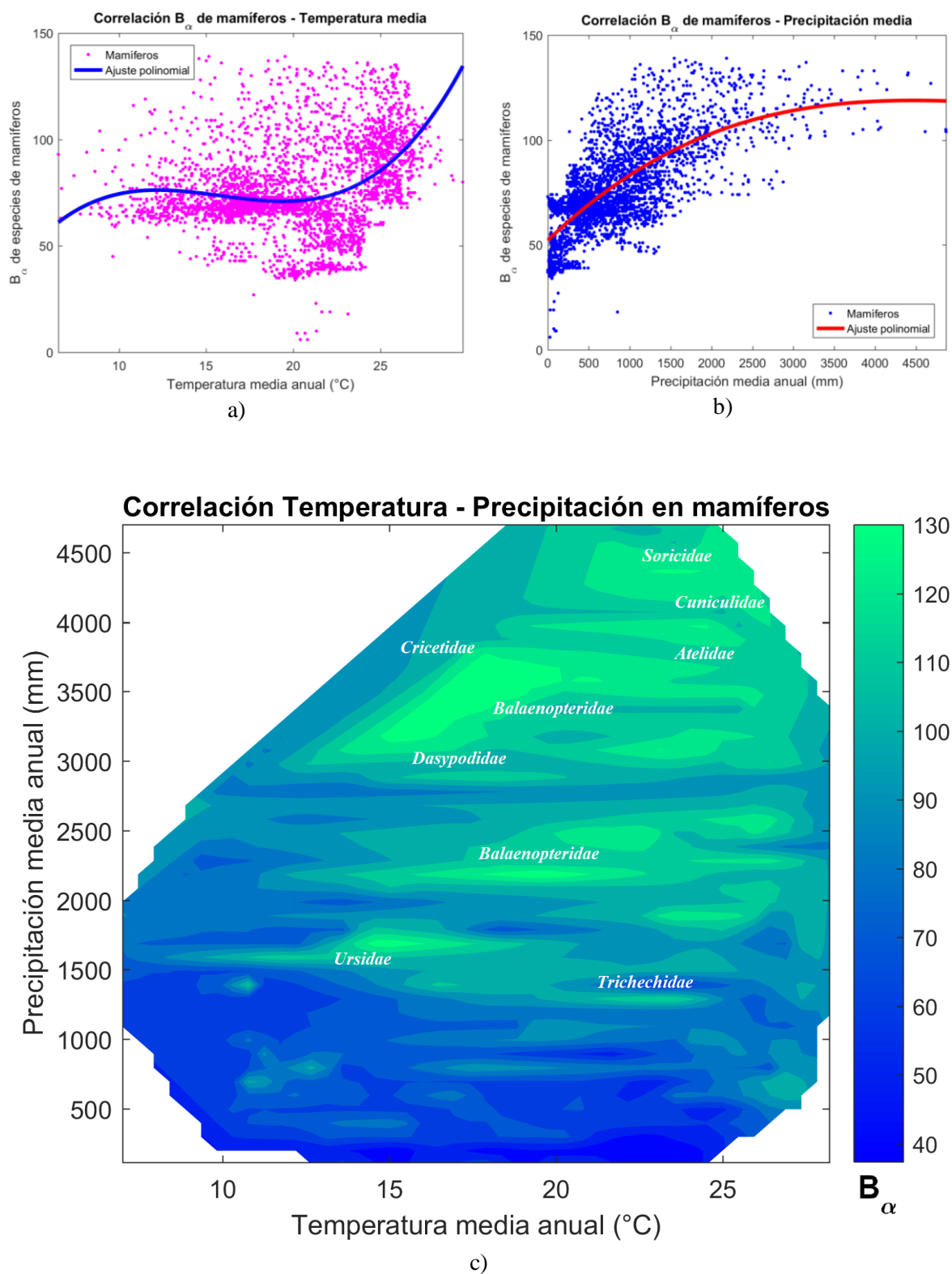


Figura 7.26 Correlación de temperatura media anual (a) y precipitación total anual (b) con mamíferos, así como su mapa de distribución en función de la temperatura media anual y precipitación total para el año 2008 (c).

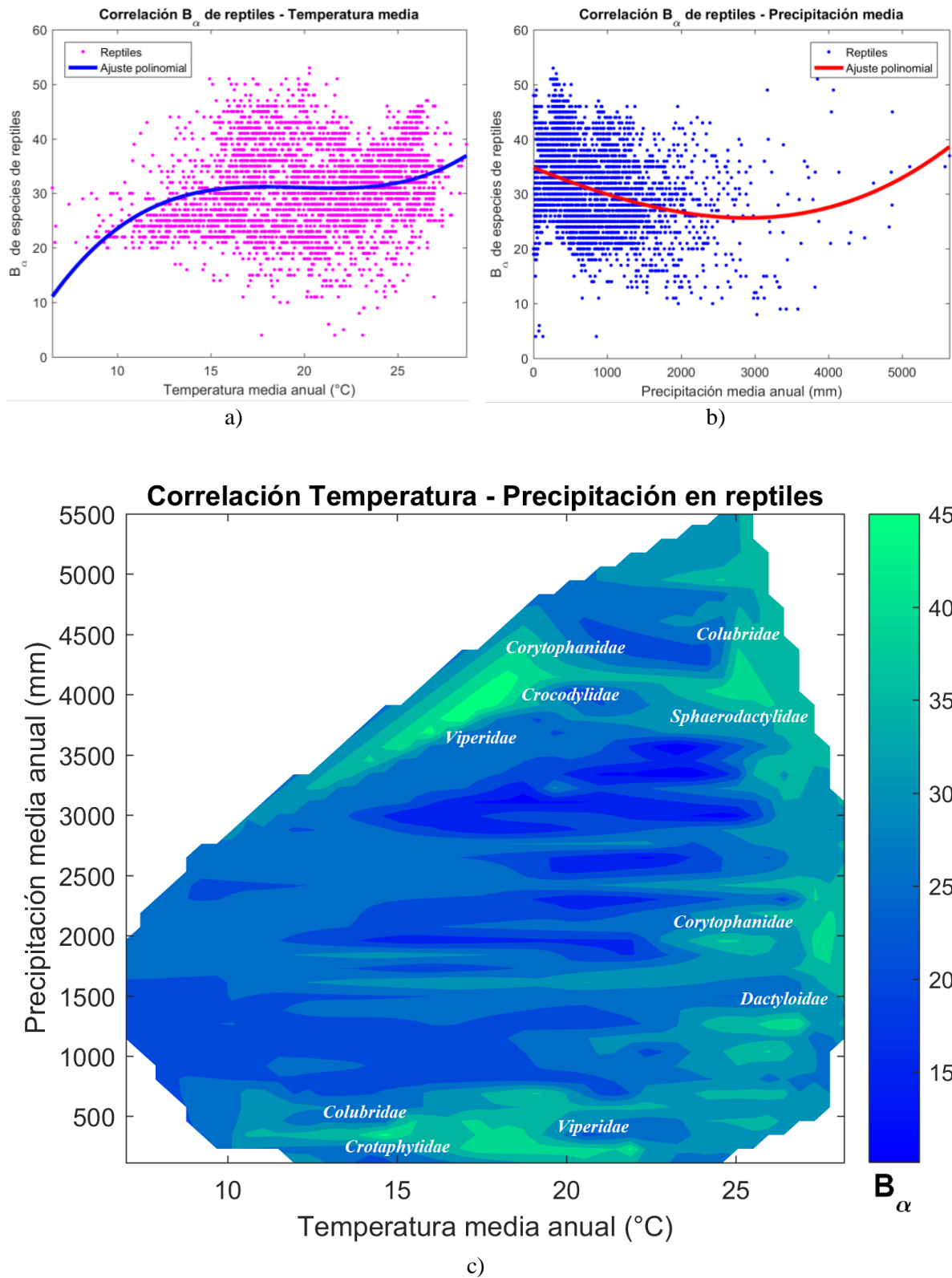


Figura 7.27 Correlación de temperatura media anual (a) y precipitación total anual (b) con reptiles, así como su mapa de distribución en función de la temperatura media anual y precipitación total para el año 2008 (c).

Tabla 7.1 Ajustes a las variables geográficas y climáticas de anfibios, mamíferos y reptiles.

	Variable	Tipo de ajuste	Grado	Expresión	R ²
Anfibios	Longitud	Polinomial	3	$0.000439x^3 + 0.1248x^2 + 12.07x + 409$	0.3676
	Latitud	Polinomial	1	$-0.4159x + 20.39$	0.2334
	Altitud	Polinomial	1	$-0.0008x + 11.22$	0.0287
	Temperatura	Polinomial	3	$0.007546x^3 - 0.38x^2 + 6.25x - 24.03$	0.2111
	Precipitación	Polinomial	3	$1.143 \times 10^{-10}x^3 - 1.36 \times 10^{-6}x^2 + 0.0056x + 7.26$	0.2694
Mamíferos	Longitud	Senoidal	3	$104.1\text{sen}(0.0405x - 7.509) + 42.09\text{sen}(0.4442x + 26.25) + 45.7\text{sen}(0.4696x + 7.102)$	0.6350
	Latitud	Polinomial	3	$-0.0072x^3 + 0.8893x^2 - 33.23x + 454.9$	0.6595
	Altitud	Polinomial	1	$0.001x + 75.75$	0.0016
	Temperatura	Polinomial	3	$0.02828x^3 - 1.342x^2 + 20.11x - 20.82$	0.1321
	Precipitación	Polinomial	3	$3.76 \times 10^{-10}x^3 - 6.70 \times 10^{-6}x^2 + 0.0373x + 52.21$	0.5221
Reptiles	Longitud	Fourier	2	$40.02 - 15.81\cos(0.1228x) + 3.659\text{sen}(0.1228x) + 8.112\cos(0.2456x) - 5.272\text{sen}(0.2456x)$	0.1415
	Latitud	Fourier	4	$30.82 - 0.8226\cos(0.3795x) - 3.165\text{sen}(0.3795x) - 1.407\cos(0.759x) - 0.273\text{sen}(0.759x) - 2.451\cos(1.1385x) - 0.5364\text{sen}(1.1385x) - 0.2218\cos(1.518x) - 0.558\text{sen}(1.518x)$	0.1541
	Altitud	Polinomial	1	$-0.0022x + 33.37$	0.0547
	Temperatura	Polinomial	3	$0.0093x^3 - 0.548x^2 + 10.7x - 37.94$	0.0434
	Precipitación	Polinomial	2	$1.962 \times 10^{-6}x^2 - 0.0086x + 36.11$	0.1013

Este análisis consistió en sobreponer la información de cambio climático en temperatura máxima, temperatura mínima (Figura 6.58), precipitación nula y precipitación no nula (Figura 6.59) con las imágenes de B_a para anfibios (Figura 7.21), mamíferos (Figura 7.22) y reptiles (Figura 7.23). La sobreposición de capas permitió ligar la B_a con las variables de cambio climático. Se consideró que cualquier variable climática, con variaciones por efectos de cambio climático, afecta el hábitat de las especies.

Los resultados muestran que, en general, las especies con preferencias por lugares cálidos (de 15 °C a 28 °C de temperatura media anual) y baja precipitación (de 70 mm a 900 mm de precipitación media anual) son las más afectadas por variaciones en la temperatura máxima ($T_{máx}$), temperatura mínima ($T_{mín}$), precipitación no nula ($P > 0$ mm) y precipitación nula ($P = 0$ mm). Es decir, las especies del norte de México son las que se encuentran en mayor riesgo por efectos de cambio climático (Figura 7.28, Figura 7.29 y Figura 7.30).

Por parte de los anfibios, se muestran afectaciones en especies de sapos anuros (familia *Scaphiopodidae*) y ambistomátidos (familia *Ambystomatidae*) son las principales familias afectadas por los efectos conjuntos del cambio climático (Figura 7.28). Así mismo, algunas especies de ranas (familia *Ranidae*) están bajo amenaza por cambios en la temperatura máxima, precipitación nula y precipitación no nula. Por su parte, especies de sapos de la familia *Rhinophrynidae* se encuentran localizadas en áreas con afectación en la temperatura máxima y la temporada de estiaje ($P = 0$ mm). Finalmente, las variaciones en temperatura máxima como mínima afectan directamente a especies de cecilias (familia *Dermophiidae*).

En cuanto a los mamíferos, el cambio climático afecta principalmente a especies de osos (familia *Ursidae*) y mamíferos acuáticos como manatíes (familia *Trichechidae*; Figura 7.29). Sin embargo, también se presentan afectaciones para especies de musarañas (familia *Soricidae*) y roedores (familia *Cuniculidae*) por variaciones en la temperatura máxima, mínima, precipitación nula y precipitación no nula.

De los tres grupos analizados, las especies de reptiles como serpientes (familia *Colubridae*), víboras (familia *Viperidae*) e iguanas (familia *Crotaphytidae*) son las más afectadas por variaciones de las cuatro variables climáticas consideradas (Figura 7.30). Adicionalmente, las lagartijas (familia *Dactyloidae*) y camaleones (familia *Corytophanidae*) se encuentran principalmente afectados por variaciones en la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación no nula.

En resumen, las especies que se localizan en áreas con un rango termal de entre 14 °C a 21 °C de temperatura media anual y con régimen de lluvia comprendido entre los 3,500 mm a 4,500 mm de precipitación media anual no se encuentran directamente afectados por variaciones climáticas generadas por cambio climático. Así mismo, se observa que una gran riqueza de mamíferos se encuentra en áreas poco afectadas. En contraste, familias de anfibios y reptiles se encuentran presentes en regiones con alta variación climática del país (principalmente el norte de México).

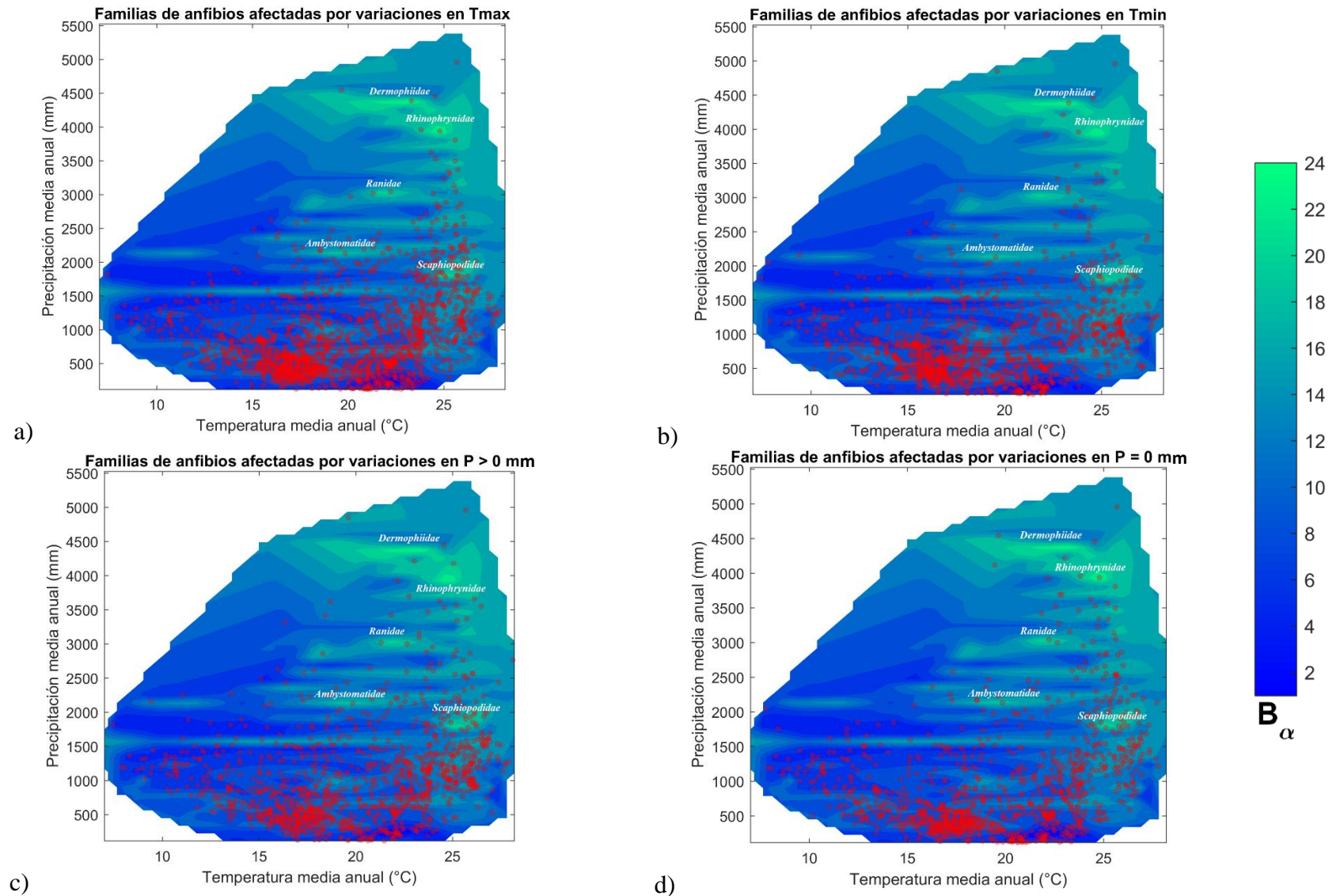


Figura 7.28 Afectación de familias de anfibios por efectos de cambio climático en: a) temperatura máxima (Tmáx); b) temperatura mínima (Tmín); c) precipitación no nula ($P > 0$ mm) y d) sequías o precipitación nula ($P = 0$ mm).

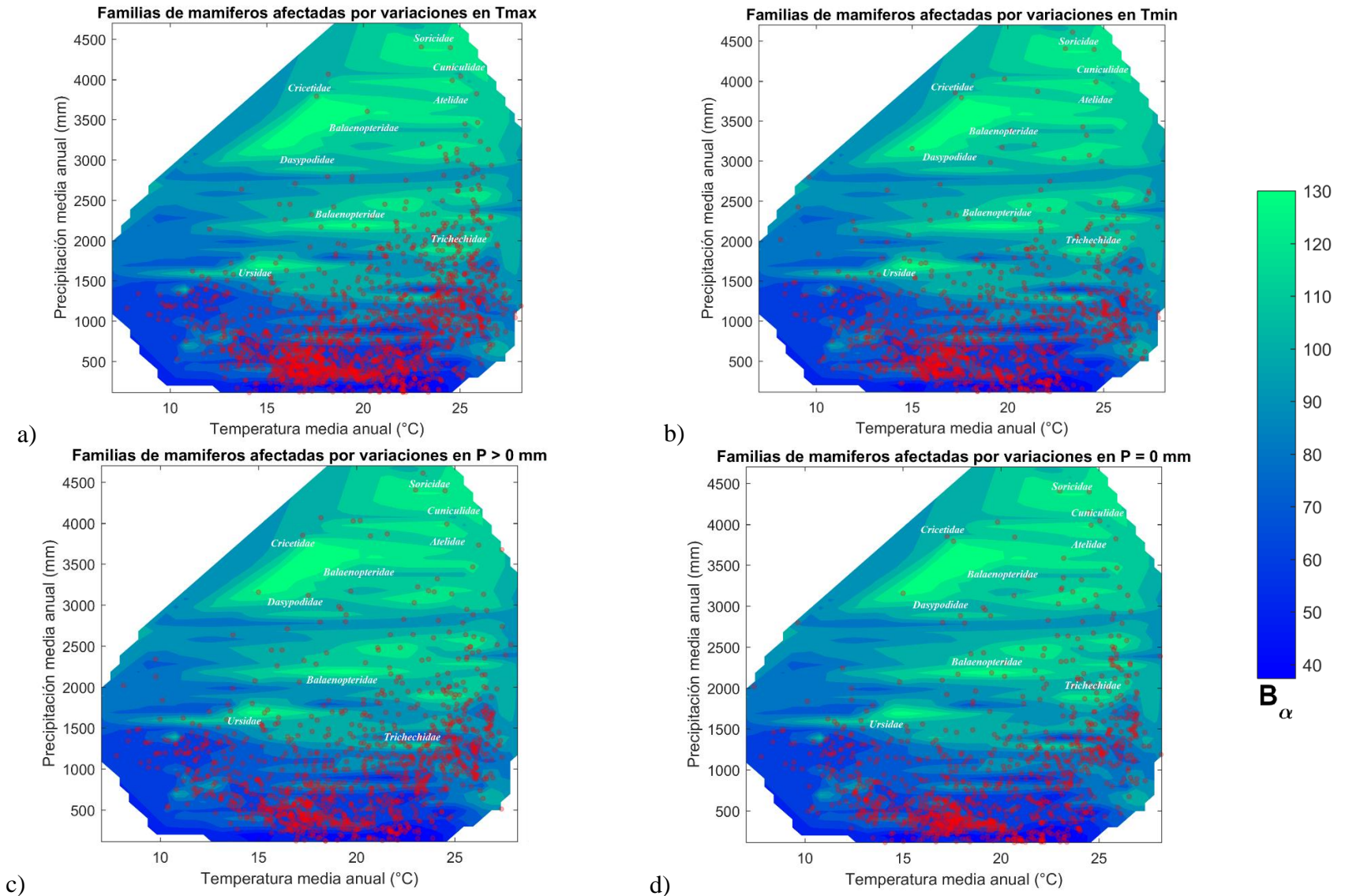


Figura 7.29 Afectación de familias de mamíferos por efectos de cambio climático en: a) temperatura máxima (Tmáx); b) temperatura mínima (Tmín); c) precipitación no nula ($P > 0$ mm) y d) sequías o precipitación nula ($P = 0$ mm).

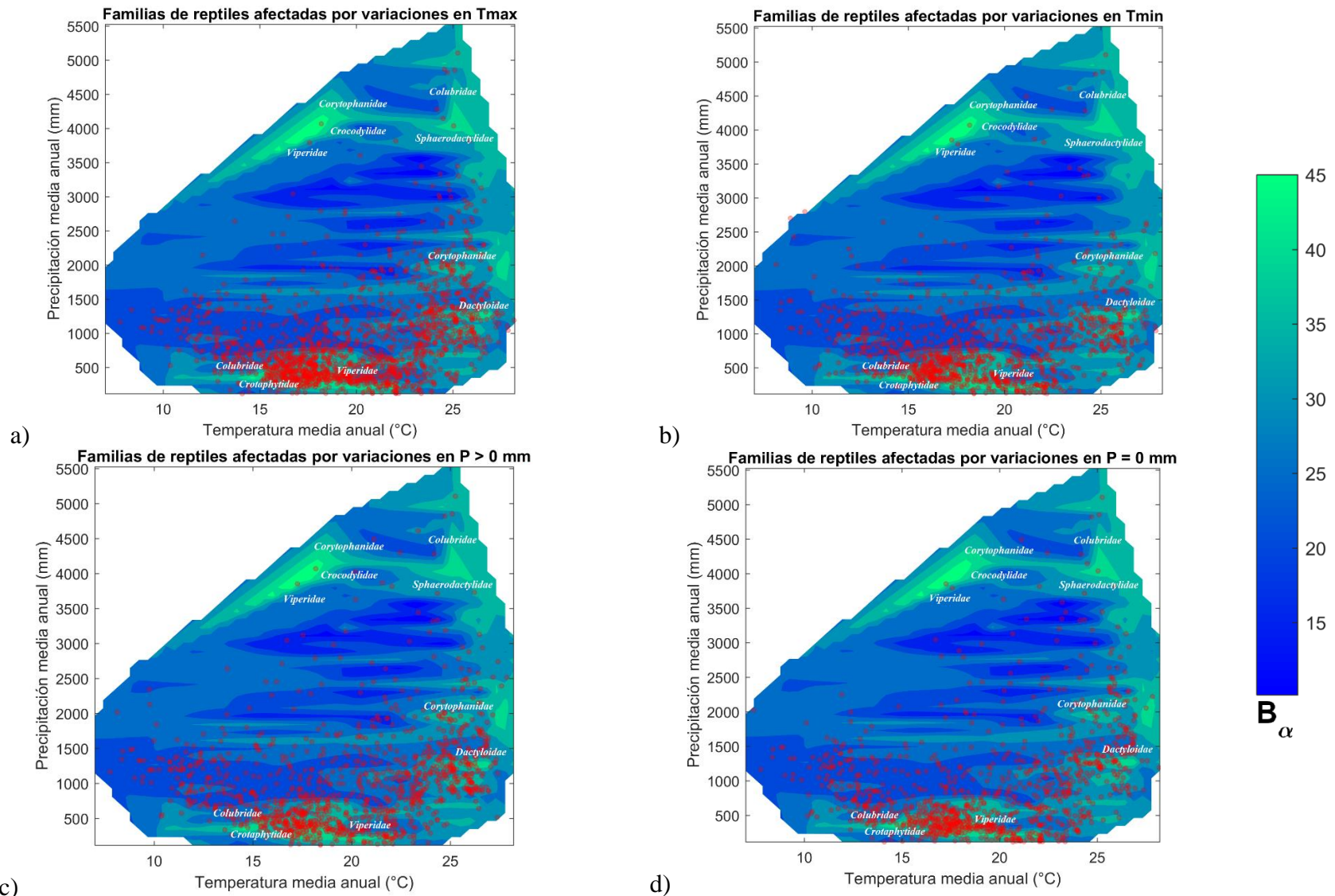


Figura 7.30 Afectación de familias de reptiles por efectos de cambio climático en: a) temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$); b) temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$); c) precipitación no nula ($P > 0$ mm) y d) sequías o precipitación nula ($P = 0$ mm).

7.4. Conclusiones y recomendaciones

Las imágenes de diversidad alfa (B_α) disponibles en el sitio de la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés), mostraron un alto grado de eficiencia en el análisis de datos ecológicos para las especies de anfibios, mamíferos y reptiles de México. Sin embargo, se recomienda replicar los análisis realizados en la presente investigación para especies de aves y peces. La clasificación de la IUCN proporciona una guía del estado de riesgo de las especies en México (Figura 7.14). Sin embargo, esta información no proporciona el origen de dicho estado por lo que se buscaron relaciones por variaciones geográficas y climáticas que proporcionaran más información al respecto.

El análisis geográfico mostró que existe una correlación notable entre las variables geográficas de latitud, longitud y altitud con la presencia/ausencia de especies de los tres grupos analizados (Figura 7.24). Tanto anfibios, mamíferos y reptiles tienen a incrementar su presencia en dirección al este de México. Por parte de la latitud, la presencia de los tres grupos mostró aminorar al incrementar la latitud hacia los polos de la Tierra, lo cual, es consistente con modelos globales de distribución de especies en el mundo (Figura 7.8). Por otro lado, la riqueza de anfibios y reptiles disminuye con el gradiente de altitud por la búsqueda de climas cálidos y humedad. Por su parte, la B_α de los mamíferos mostró un ligero incremento con el gradiente de altitud por lo que se concluye que los mamíferos tienen una mayor plasticidad a gradientes altitudinales que los reptiles y anfibios.

Con el análisis climático se mostraron las relaciones existentes entre la presencia/ausencia de las especies y la dinámica del clima regional de una cierta zona. Adicionalmente, permitió caracterizar la B_α en función de la temperatura media anual y precipitación media anual (Figura 7.25, Figura 7.26 y Figura 7.27). Se observó que, en general, son las condiciones de humedad lo que permiten diferenciar los grupos de anfibios, reptiles y mamíferos, ya que los tres grupos muestran una preferencia por ubicaciones cálidas. Adicionalmente, el análisis de cambio climático permitió identificar las familias con mayor afectación por variaciones climáticas generadas por cambio climático en México (Figura 7.28, Figura 7.29 y Figura 7.30). Se observó que las especies que se encuentran en el norte de México presentan una mayor vulnerabilidad ante estos efectos. Sin embargo, también se muestran afectaciones en latitudes menores para anfibios y reptiles principalmente.

El análisis presentado en este capítulo empleó el estado de riesgo de especies de anfibios, mamíferos y reptiles según las clasificación del IUCN y añade la vulnerabilidad por efectos de cambio climático. Se recomienda complementar el presente estudio con información relativa al cambio de uso de suelo para identificar la vulnerabilidad del hábitat por crecimiento urbano, o bien, por deforestación para actividades agrícolas, ganaderas y/o industriales. A pesar de la ausencia de información de uso de suelo, se cuenta con información suficiente para proponer áreas de riesgo ecológico en función del estado de riesgo IUCN y vulnerabilidad por cambio climático. Dicha información se presenta a nivel de cuenca hidrológica en la Figura 7.31.

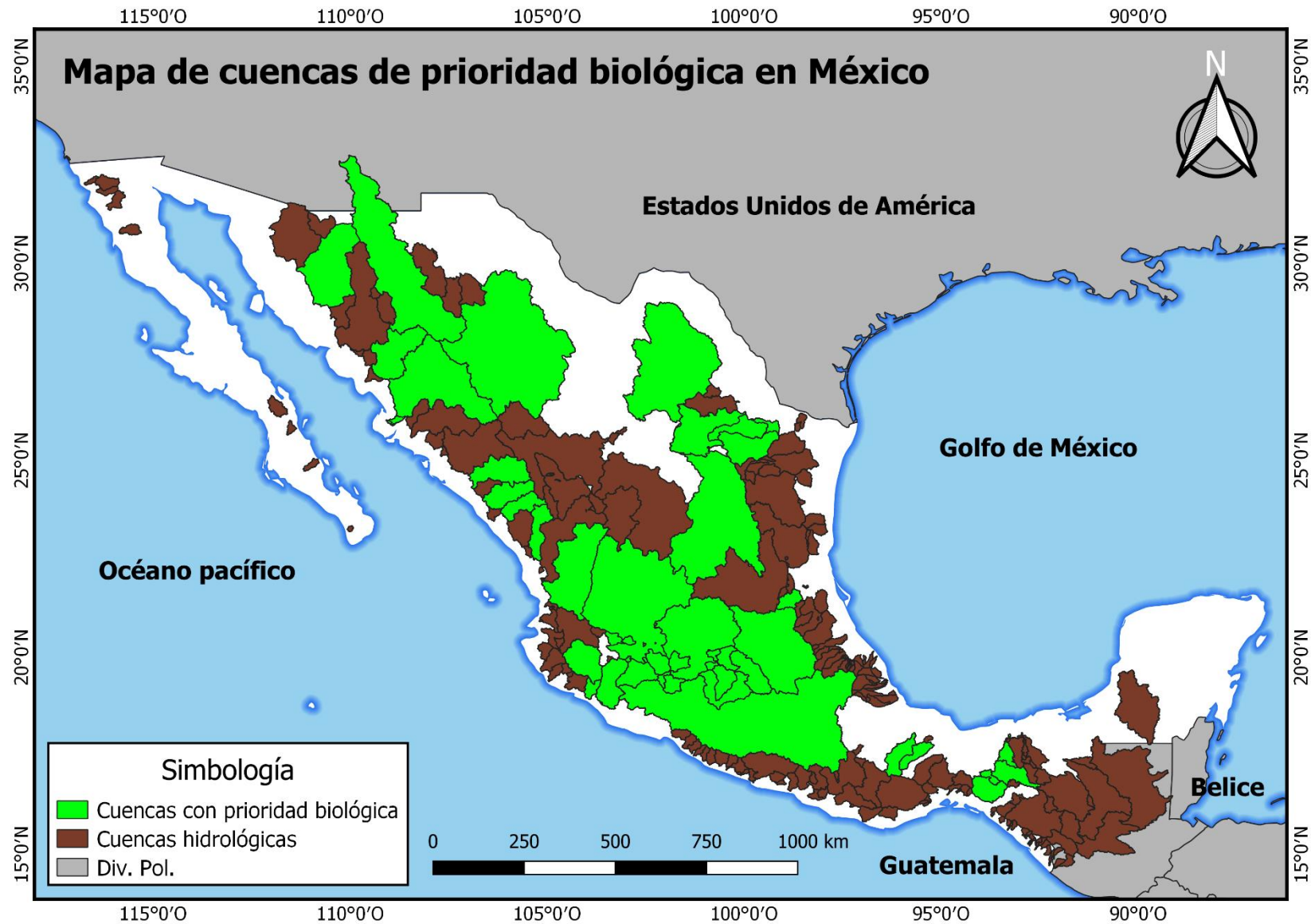


Figura 7.31 Mapa de cuencas con prioridad biológica por clasificaciones NT, EN, EC y vulnerabilidad al cambio climático.

CAPÍTULO 8

REGIONALIZACIÓN

8.1. Introducción

En cualquier estudio multivariable se estima una cantidad exhaustiva de información. Frecuentemente, existe una correlación significativa entre las variables analizadas o datos generados. El uso de la información bruta puede llevar a sobre estimar o subestimar alguna variable y los modelos pierden consistencia o incrementan sus incertidumbres. Dicho efecto se refleja en la estimación de los errores estadísticos al momento de su validación ([Balasko, Abonyi y Feil, 2005](#)). Sin embargo, existen diferentes técnicas para agrupar la información y clasificarla según las semejanzas o diferencias entre los elementos estudiados. En efecto, existirán individuos con comportamientos similares a otros. Su clasificación permite identificarlos fácilmente para organizar mejor sus características o simplemente para reducir el número de variables que explican su varianza.

En el campo de la hidrología, es común encontrar clasificaciones de cuencas con base en sus parámetros fisiográficos. Diversos autores han regionalizado grupos de cuencas por características fisiográficas, climáticas o por regímenes de caudal de forma aislada ([Hoppner et al., 1999](#)). Sin embargo, se ha incrementado el número de publicaciones con estudios de regionalización multivariable. En el caso del caudal ecológico, el método ELOHA (por sus siglas en inglés) sugiere una regionalización hidro-ecológica para conocer las cuencas con aspectos similares ([Poff et al., 2010](#)).

En el presente trabajo de investigación, se realiza una regionalización de cuencas hidrográficas multivariable. La finalidad es clasificar cuencas no alteradas con parámetros similares para, posteriormente, generar modelos de regresión multivariable con el caudal ecológico como variable explicada. Las variables consideradas para efecto de la regionalización son: i) parámetros fisiográficos; ii) parámetros de régimen de caudales; iii) índices de alteración hidrológica; iv) variables climáticas; v) índices de cambio climático; vi) variables socioeconómicas y vii) resultados de diversidad de especies. La regionalización se realiza a través de un análisis de conglomerados (*cluster analysis*) cuyos detalles se explican en las secciones siguientes.

8.2. Métodos de análisis de conglomerados (*cluster analysis*)

Como técnica de agrupación de variables, el análisis de conglomerados (AC) es similar al análisis factorial. Sin embargo, la factorización es poco flexible en algunos de sus supuestos (linealidad, normalidad, variables cuantitativas, etc.) y siempre estima la matriz de distancias de la misma forma. El AC es menos restrictivo en sus supuestos: no exige linealidad, ni simetría, permite variables categóricas, etc. Adicionalmente, la matriz de distancias puede ser estimada por diversos algoritmos.

El AC también es similar al análisis discriminante. La diferencia radica en que mientras el análisis discriminante efectúa la clasificación con base en una variable dependiente, el AC permite detectar el número óptimo de grupos y su composición. Así mismo, el AC no asume ninguna distribución específica para las variables y permite resaltar la estructura de los datos. El AC no sólo puede ser utilizado para agrupación de información, sino para reducción de modelos y optimización (Balasko, Abonyi y Feil, 2005).

Diversas técnicas de conglomeración pueden ser aplicadas a datos cuantitativos, cualitativos o combinación de ambos tipos. Típicamente, los datos provienen de observaciones de algún proceso físico, económico o social. Cada observación consiste en un número n de variables aforadas, agrupadas en un vector columna n -dimensional $x_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}]^T \forall x_k \in R^n$. Un conjunto de N observaciones es denotado como $X = \{x_k | k = 1, 2, \dots, N\}$ y puede ser representado de forma matricial como:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{Nn} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8-1}$$

Los vectores renglón de X son conocidos como objetos, las columnas como atributos y la matriz X como matriz de patrones. El significado de cada renglón y columna puede variar de acuerdo con el fenómeno estudiado y el área de aplicación. En el presente trabajo de investigación, los objetos de la matriz X constituyen las variables, las columnas las cuencas hidrográficas y X es referida sólo como matriz de datos.

La clasificación de los métodos de AC es variada. Sus variaciones se derivan de la forma en cómo aceptan las similitudes entre un grupo y otro. El término ‘similitudes’ se entiende como similitud matemática y frecuentemente se define la media de las normas vectoriales o distancias entre las covarianzas de los datos (Tabla 8.1). En general, las técnicas de agrupación del AC pueden ser de aglomeración o de partición (Hastie et al., 2008).

Tabla 8.1 Distancias comúnmente utilizadas en análisis de conglomerados. Fuente: adaptada de Berzal (2018).

Tipo de distancia	Expresión	Uso recomendado
Euclidiana cuadrada	$d(x_{ki}, x_{kj}) = \sum_{i=1}^n (x_{ki} - x_{kj})^2$	Etapas de exploración, fenómenos con comportamiento lineal.
Euclidiana	$d(x_{ki}, x_{kj}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ki} - x_{kj})^2}$	Etapas de exploración, fenómenos con comportamiento lineal.
Chebychev	$d(x_{ki}, x_{kj}) = \text{Max}(x_{ki} - x_{kj})$	Fenómenos con alta variabilidad en su estructura espacial o en la naturaleza de sus datos.
Manhattan	$d(x_{ki}, x_{kj}) = \sum_{i=1}^n x_{ki} - x_{kj} $	Fenómenos con variabilidad uniforme en su estructura espacial o en la naturaleza de sus datos.

Donde: x_{ki} es el i -ésimo elemento del cluster k y x_{kj} es el j -ésimo elemento del cluster k .

8.2.1. Métodos de aglomeración.

Estos métodos han sido utilizados ampliamente por su facilidad de uso. La agrupación comienza colocando cada observación en un conglomerado separado, es decir, cada observación forma un *cluster*. Los conglomerados se unen de dos en dos hasta que su número es reducido a un objetivo deseado. En cada etapa, los grupos son unidos en pares de acuerdo a su cercanía. Polhemus (2006) menciona que los criterios de unión más usados son:

- *Vecino más cercano*: la distancia entre dos grupos es la mínima de las distancias entre cualquier miembro de un conglomerado con cualquier miembro de otro *cluster*.
- *Vecino más lejano*: la distancia entre dos grupos es la máxima de las distancias entre cualquier miembro de un conglomerado con cualquier miembro de otro *cluster*.
- *Centroide*: la distancia entre dos grupos es la distancia entre los centroides de cada conglomerado, donde el centroide es localizado en el valor promedio de cada variable.
- *Mediana*: la distancia entre dos grupos es la distancia entre las medianas de cada conglomerado, donde la mediana es localizada en la mediana de cada variable.
- *Promedio de grupo*: la distancia entre dos grupos es la distancia promedio entre todos los miembros de un conglomerado a todos los miembros del otro.
- *Método de Ward*: la distancia entre dos grupos está en función del incremento en la suma de las desviaciones cuadradas alrededor de la media del conglomerado que se formaría si los dos *clusters* estuvieran unidos.

La representación gráfica del AC por aglomeración se conoce como dendograma. En él, se grafican las uniones del conjunto de N observaciones por pares en el eje de las abscisas. La

distancia de unión de cada grupo se reporta en el eje de las ordenadas. La muestra un ejemplo de dendograma como resultado de un AC de diez grupos de variables (x_1, x_2, \dots, x_{10}) agrupados por vecino más lejano cuyas distancias fueron estimadas por distancia euclidiana cuadrada.

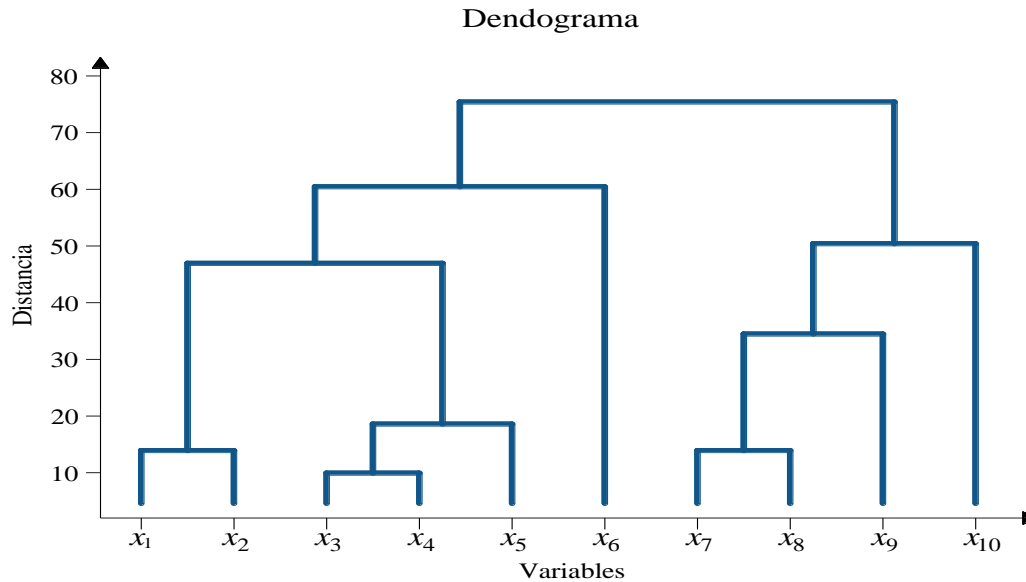


Figura 8.1 Ejemplo de dendograma para métodos de aglomeración.

8.2.2. Métodos de partición.

Los métodos de partición tienen su fundamento matemático en la teoría de conjuntos donde un conglomerado puede ser visto como un subconjunto A_i de la matriz de datos X . Actualmente, este grupo de métodos es dividido en función de la naturaleza de cada subconjunto A_i en métodos de partición dura y de partición difusa (Balasko, Abonyi y Feil, 2005).

Los métodos de partición dura se basan en la teoría clásica de conjuntos donde la matriz X es dividida en un número c de subconjuntos A_i mutuamente excluyentes. Si el número de subconjuntos c es conocido, la partición dura puede ser definida como una familia de subconjuntos $\{A_i | 1 \leq i \leq c \subset P(X)\}$ con propiedades:

$$\bigcup_{i=1}^c A_i = X \quad \text{Ec. 8-2}$$

$$A_i \cap A_j = \emptyset, \quad 1 \leq i \neq j \leq c \quad \text{Ec. 8-3}$$

$$\emptyset \subset A_i \subset X, \quad 1 \leq i \leq c \quad \text{Ec. 8-4}$$

Las ecuaciones anteriores expresan que la unión de todos los subconjuntos A_i debe ser igual a la matriz X . Un subconjunto A_i es mutuamente excluyente de cualquier otro subconjunto A_j . El conjunto vacío \emptyset es un subconjunto de la matriz X , es decir, todos los elementos de X quedan

clasificados en algún subconjunto. Los métodos de partición dura más comunes son K-means (MacQueen, 1967) y K-medoids (Kaufman y Rousseeuw, 1990).

Por otra parte, los métodos de partición difusa conceden a un elemento x_k pertenecer a diferentes subconjuntos A_i con diferentes grados de pertenencia. En muchas situaciones, la partición difusa brinda mejores resultados que la partición dura. Sus ventajas se ven reflejadas en los elementos ubicados en los bordes de cada subconjunto ya que no son asignados por completo a un cierto grupo. A cada elemento cuenta con un grado de pertenencia entre 0 y 1 indicando.

Para un número de subconjuntos c con N observaciones y funciones de pertenencia μ , la estructura de partición difusa U queda expresada como:

$$U = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{N1} & \mu_{N2} & \cdots & \mu_{Nn} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8-5}$$

Los métodos de partición difusa más conocidos son Fuzzy C-means (Bezdek y Dunn, 1975), Gustafson-Kessel (Gustafson y Kessel, 1979) y Gath-Geva (Gath y Geva, 1989). Su aplicación requiere de principios de lógica difusa y establecer las funciones de pertenencia por lo que su uso queda fuera de los alcances del presente trabajo de investigación.

Métodos K-means y K-medoids

Estos métodos de partición dura son simples y populares pero sus resultados pueden verse sesgados con facilidad. Al considerar una matriz de datos X de dimensiones $N \times n$, los métodos K-means y K-medoid ubican cada punto observado dentro de un subconjunto A_i y buscan reducir la suma de diferencias cuadradas entre las distancias:

$$\sum_{i=1}^c \sum_{k \in A_i} \|x_k - v_i\|^2 \quad \text{Ec. 8-6}$$

Donde: A_i es un subconjunto de datos x_k en el i -ésimo cluster; c es el número total de subconjuntos y v_i es el prototipo de grupo.

La diferencia entre el método K-means y K-medoids radica en el prototipo del conglomerado (v_i). K-means emplea el centroide de cada *cluster* como prototipo, lo que lo vuelve vulnerable a valores singulares en la matriz de datos. En K-medoids, el prototipo está dado por la ubicación del dato más cercano a la media de los elementos de un subconjunto A_i . En general, K-medoids ha mostrado ser más eficiente que K-means pero limitado a conjuntos discretos de datos (Hastie et al., 2008).

8.2.3. Validación del número de conglomerados.

Cualquier método de AC busca obtener el mejor ajuste a un número fijo de conglomerados y parametrizar sus siluetas en el espacio. Sin embargo, el mejor ajuste no significa que el número de grupos obtenido sea consistente con los datos. Tal vez el número de grupos no es el correcto o sus siluetas no representan adecuadamente los subconjuntos de datos. Por tal razón, existen diferentes formas de validar el número de conglomerados para verificar su consistencia con la forma, estructura y contenido de los datos. Existen un número cuantioso de indicadores para tal fin. Ninguno de ellos es necesariamente mejor que los otros, de hecho, sus resultados se asemejan y su uso depende de la naturaleza de la agrupación. Se describen algunos de ellos en los párrafos sucintos.

Coefficiente de partición (CP): mide el traslape entre conglomerados (Bezdek, 1981), carece de conexiones directas con los datos y el número óptimo de grupos es el valor máximo. Es definido como:

$$CP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N (\mu_{ij})^2 \quad \text{Ec. 8-7}$$

Donde: μ_{ij} es la pertenencia del dato j en el conglomerado i ; N es el número de datos en el conglomerado i y c es el número de *clusters*.

Índice de Dunn (ID): fue propuesto por Dunn y Bezdek (1975) para identificar conglomerados compactos y bien separados. Depende del tamaño de datos N y se vuelve computacionalmente ineficiente en números grandes de *clusters* c :

$$ID = \min_{i \in c} \left\{ \min_{i \in c | i \neq j} \left\{ \frac{\min_{x \in Ci, y \in Cj} [d(x, y)]}{\max_{k \in c} \{ \max_{x, y \in Ck} [d(x, y)] \}} \right\} \right\} \quad \text{Ec. 8-8}$$

Donde: $d(x, y)$ es la distancia entre un dato x perteneciente a un subconjunto Ci y un dato y perteneciente a un subconjunto Cj .

Índice silhouette (S): mide la compactación de los conglomerados con relación a las diferencias internas de datos en su propio *cluster* y las sus diferencias con los datos de otro *cluster* (Rousseeuw, 1987). El valor óptimo es el más cercano a la unidad.

$$S = \frac{\min_{x \in Ci, y \in Cj} [d(x, y)] - \frac{1}{2N_i} \sum_{x=1}^{N_i} \sum_{z=1}^{N_i} d(x_x, x_z)}{\max \left\{ \min_{x \in Ci, y \in Cj} [d(x, y)], \frac{1}{2N_i} \sum_{x=1}^{N_i} \sum_{z=1}^{N_i} d(x_x, x_z) \right\}} \quad \text{Ec. 8-9}$$

Donde: $d(x, y)$ es la distancia entre un dato x perteneciente a un subconjunto Ci y un dato y perteneciente a un subconjunto Cj ; $d(x_x, x_z)$ es la distancia entre un dato x_x y x_z pertenecientes al mismo *cluster* Ci y N_i es el número de datos del *cluster* Ci .

8.3. Problema de sobre ajuste

Uno de los problemas más comunes durante el proceso de clasificación es sobre ajustar el modelo de tal forma que se pueda determinar la clasificación “perfecta” (Hastie et al., 2008; Kim, 2017). Por ejemplo, se consideran los datos mostrados en la Figura 8.3a donde se desea encontrar la línea que permita clasificar los datos en dos grupos. Algunos científicos y/o practicantes podrían buscar una solución perfecta a los datos mostrados donde queden perfectamente definidos los elementos pertenecientes a cada grupo (Figura 8.3b). Sin embargo, si se obtuviera una nueva observación naranja que cayera dentro de algún grupo azul, la clasificación propuesta dejaría de tener veracidad y se tendría que efectuar nuevamente. Por otro lado, permitir algunos elementos naranjas dentro del grupo azul y viceversa (Figura 8.3c) tiene tres ventajas respecto a la clasificación sobre ajustada: i) el algoritmo de solución es más simple y fácil de interpretar; ii) el modelo es laxo para nuevas posibles observaciones con características muy semejantes a las de los grupos establecidos y iii) no es necesario repetir el proceso de clasificación salvo que se cuenten con nuevas características o haya elementos suficientes para definir una nueva clase (Kim, 2017).

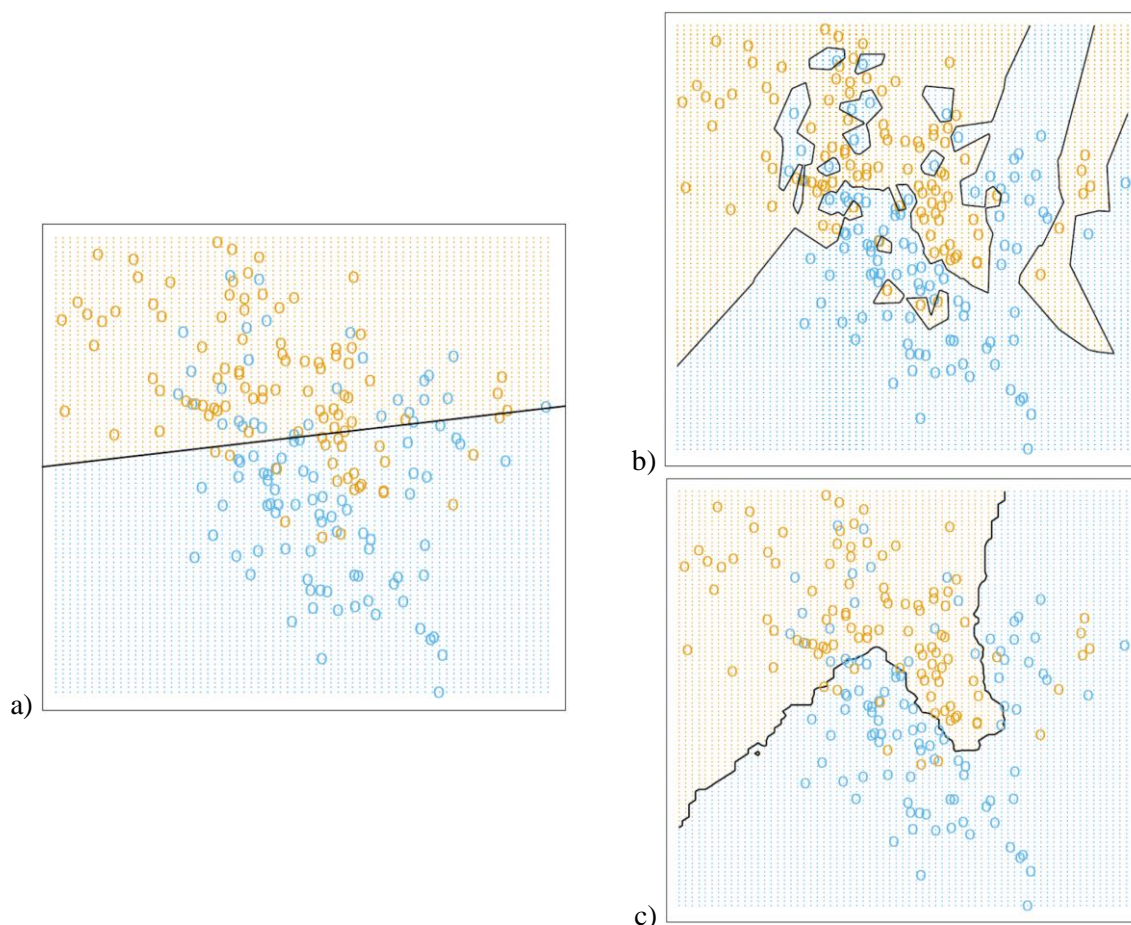


Figura 8.2 Ejemplo de sobre ajuste de datos al clasificar: a) datos que se desean clasificar; b) clasificación sobre ajustada y c) clasificación sin sobre ajuste. Fuente: adaptada de Hastie et al. (2008).

8.4. Valores medios por cuenca hidrográfica

El proceso de regionalización demanda que la estructura de los datos sea de forma matricial (Ec. 8-10 y Ec. 8-11). Por tal razón, se requiere resumir la información espacial de los datos climáticos (temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) a un valor numérico por cuenca. Esta rutina también deberá ser empleada al momento de estimar el caudal ecológico en algún sitio no aforado.

La forma más sencilla de resolver el problema es estimar el promedio de todos los píxeles que caen dentro del parteaguas de la cuenca. Este procedimiento demanda el trazado del parteaguas cada vez que se desee estimar la variable espacial sobre algún punto del río. Sin embargo, el mismo resultado puede ser obtenido mediante una acumulación espacial de la variable por el método D8, es decir, se realiza un procedimiento de *runoff* donde se acumulan el número de celdas y la magnitud.

Considere un Modelo Digital de Elevación (Figura 8.3a; DEM, por sus siglas en inglés), donde el sentido del escurrimiento está condicionado por la topografía (Figura 8.3b). Siguiendo la dirección del flujo, se acumulan el número de celdas (Figura 8.3c). La Figura 8.3d muestra la forma de la cuenca cuyo exutorio cae en el lugar donde se acumulan 8 celdas. Por otro lado, se tiene una imagen de alguna variable climática (Figura 8.3e). Si la magnitud de esta imagen se acumula siguiendo el mismo patrón de flujo (Figura 8.3f), se obtendrá la Figura 8.3g. Finalmente, el valor medio de cualquier punto sobre la cuenca está dado por el cociente de la variable acumulada entre el número de celdas (Figura 8.3h). Este procedimiento permite conocer la magnitud promedio en cualquier punto de la cuenca.

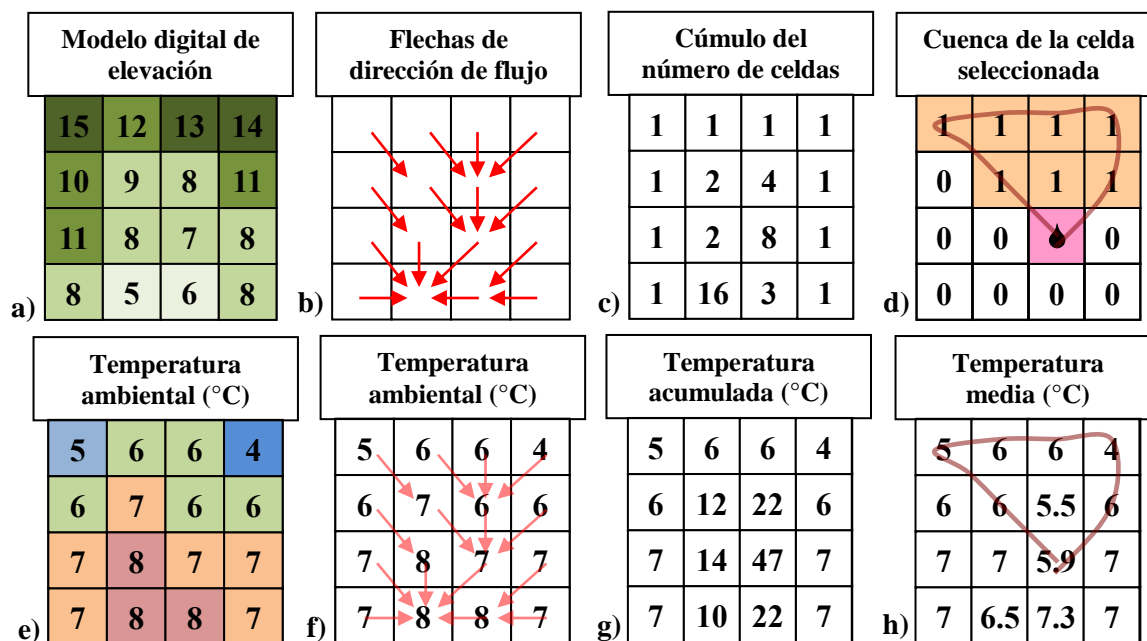


Figura 8.3 Procedimiento para estimar valores medios de variables climáticas.

8.5. Regionalización de cuencas en México

A inicios del siglo XXI la administración del agua en México ha evolucionado en presenciado un auge notable de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). Así mismo, se han tomado acciones para la descentralización del manejo hídrico de planes federales a planes “regionales” y se ha incrementado la privatización del servicio de suministro de agua (Scott y Banister, 2008). Estas acciones han requerido la formulación de regiones hidrológicas que engloben la mayor cantidad de información posible, para su integración en planes tácticos con enfoque de GIRH.

Desde entonces, se han realizado diversas regionalizaciones empleando algoritmos de análisis de conglomerados (*cluster analysis*). Por ejemplo, Salmerón-García et al (2011) clasificaron la concentración clorofila- α en el Golfo de México, el cual quedó dividido en 14 regiones homogéneas que muestran la variabilidad espacial de esta sustancia. En la cuenca del río Duero, Michoacán, se determinaron cuatro unidades ambientales definidas por homogeneidad en datos hidrológicos, muestras de suelo y parámetros físico-químicos del agua (Cruz-Cárdenas et al., 2017). Un estudio que englobó variables hidrológicas, económicas y sociales a nivel de sub-cuencas urbanas, fue realizado por Cervantes-Jiménez et al. (2017) donde se obtuvieron cinco regiones socio-ecológicas para todo el territorio nacional. Así mismo, se han vinculado las características climáticas con la cobertura vegetal del país, el cual quedó clasificado en doce regiones (Pineda-Martínez y Carbajal, 2017). En esta sección, se buscará generar una regionalización eco-hidrológica con base en las variables consideradas en la presente investigación.

8.5.1. Materiales y métodos

Dentro del marco de la presente investigación, se han obtenido resultados relativos al estado de alteración hidrológica en los cauces mexicanos (Capítulo 4). Dichos resultados mostraron grupos de cuencas en estado alterado y no alterado con base en el análisis de su régimen hidrológico (Figura 4.13 a Figura 4.20). Por tal razón, el procedimiento de regionalización de cuencas hidrológicas se lleva a cabo para los grupos de cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico. Esta distribución de cuencas será empleada para estimar el caudal ecológico en su periodo natural y actual.

Para el caso de las cuencas no alteradas en su régimen hidrológico, las variables consideradas para efecto de la regionalización son: i) parámetros fisiográficos; ii) variables climáticas y iii) diversidad alfa de reptiles, anfibios y mamíferos. El objetivo de esta regionalización es mostrar las condiciones naturales ordinarias en el periodo previo a alteraciones en el régimen de los cauces mexicanos. De esta forma, se pretende que las regiones muestren condiciones homogéneas con base en su fisiografía (parámetros fisiográficos), a los regímenes termales y pluviales (variables climáticas) y a las condiciones potenciales de distribución de especies de mamíferos, reptiles y anfibios (diversidad alfa).

Por su parte, las variables seleccionadas para efecto de la regionalización de cuencas alteradas en su régimen hidrológico son: i) parámetros fisiográficos; ii) índices de alteración hidrológica (IAH); iii) variables climáticas; iv) porcentaje de área afectada por efectos de cambio climático; v) variables socioeconómicas y vi) diversidad alfa de especies de mamíferos, anfibios y reptiles. La finalidad de esta segunda regionalización es agrupar las cuencas alteradas en función del estado actual de su régimen hidrológico, climático, socioeconómico y ecológico.

Al contar con dos regionalizaciones de cuencas hidrológicas, tanto en su estado alterado y no alterado en su régimen hidrológico, es posible estimar las series de caudal natural y alterado en función de las características de ambos grupos de cuencas. La estimación de las series de caudal es objeto de estudio del Capítulo 9.

El proceso de regionalización, para cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico, se llevó a cabo por un análisis jerárquico de conglomerados en su variante de K-medoids. El método de disimilitud adoptado fue distancia de Chebychev (Tabla 8.1) ya que existe una gran variabilidad en la estructura espacial de los datos empleados en el análisis. Las siguientes recomendaciones, propuestas por Berzal (2018), fueron consideradas para una mayor eficiencia durante el análisis:

- Eliminar cualquier objeto que presente un comportamiento anormal en sus atributos en comparación al conjunto de datos que se analizará.
- Realizar diferentes realizaciones de agrupamiento, haciendo variar el método de agrupación y el tipo de distancia empleada para contrastar los resultados.
- Evaluar el número óptimo de grupos por medio de cualquier indicador estadístico. Esta evaluación es una referencia y podría no ser el resultado final del procedimiento. El número de grupos puede cambiar según:
 - Si se cuenta con un grupo con pocos objetos, agruparlo con el grupo más próximo en el dendograma o con el grupo con menor disimilitud.
 - Si se cuenta con grupos cuya disimilitud no sea notoria, modificar el método de disimilitud.
- Incorporar restricciones si se cuenta con un conocimiento previo del comportamiento del fenómeno analizado.
- El resultado final deberá reflejar formas arbitrarias de fácil interpretación. De ser necesario, modificar el número de grupos.

8.5.2. Resultados

Los resultados muestran cuatro regiones de comportamiento homogéneo para las cuencas no alteradas en su régimen hidrológico. Por otro lado, se obtuvieron cinco regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico. La descripción para cada grupo de cuencas analizado se presenta en detalle en las secciones siguientes.

Cuencas no alteradas en su régimen hidrológico

Las cuencas no alteradas en su régimen hidrológico fueron clasificadas en cuatro grupos con características homogéneas. El procedimiento se repitió desde dos grupos de cuencas hasta quince grupos. Posteriormente, se estimó el índice silhouette (S) para conocer las variaciones entre elementos de cada uno de éstos (Figura 8.4). De este análisis se seleccionaron cuatro grupos óptimos de cuencas hidrológicas con una valoración $S = 0.91$.

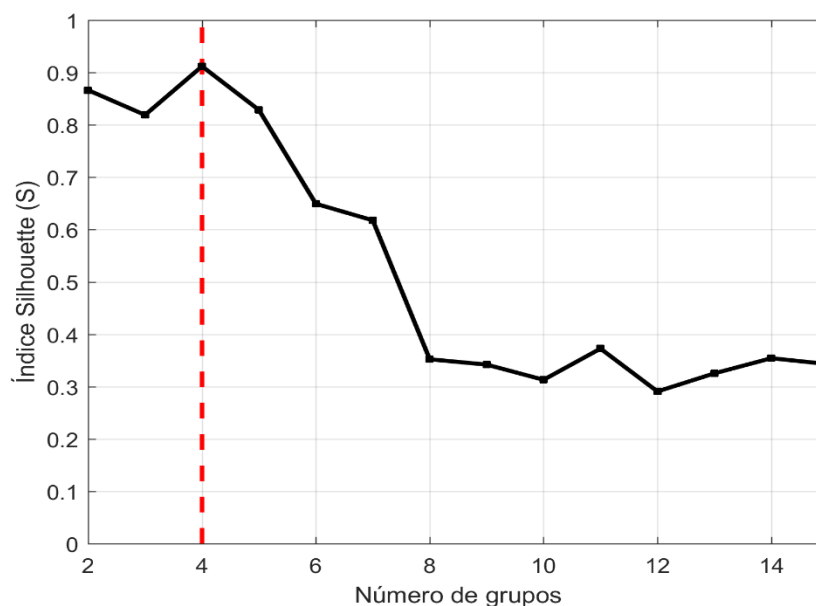


Figura 8.4 Validación del número óptimo de regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

De la distribución espacial de los *clusters* obtenidos (Figura 8.5) se definen cuatro regiones homogéneas descritas en las secciones siguientes.

- Región 1: cuencas medianas y grandes en ambas costas de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 1,625 km² a los 50,635 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 284 msnm a 2,279 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [12.42, 35.87] (Tabla 8.2). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas ($R_{ci} \in [0.08, 0.27]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 13.44 h hasta 70.00 h. Debido a su ubicación costera a lo largo de la Sierra Madre Occidental y Oriental, la precipitación media anual oscila desde los 789 mm a los 5,736 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 19.2$ °C; C.V. = 0.19). Así mismo, existe una variabilidad poco significativa en la diversidad alfa (D_α) de mamíferos y reptiles más no en anfibios. Es decir, en esta región se encuentran cuencas hidrológicas grandes, con tiempos de respuesta prolongados, variación en su precipitación y D_α de anfibios (Figura 8.6 a Figura 8.7).

- Región 2: cuencas pequeñas en ambas costas de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 5 km² a los 3,242 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 15 msnm a 482 msnm mientras que la pendiente media(%) se encuentra dentro del intervalo [2.25, 44.49] (Tabla 8.3). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas a ovals ($R_{ci} \in [0.08, 0.43]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 0.01 h hasta 21.88 h. Debido a su ubicación costera a lo largo de la Sierra Madre Occidental y Oriental, la precipitación media anual oscila desde los 382 mm a los 4,782 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 20.04$ °C; C.V. = 0.17). Así mismo, existe poca variabilidad en la D_a de mamíferos. Es decir, en esta región se encuentran cuencas hidrológicas pequeñas, con tiempos de respuesta rápidos, variación en su precipitación y D_a de anfibios y reptiles (Figura 8.6 a Figura 8.7).

- Región 3: cuencas del altiplano – norte de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 4,268 km² a los 50,684 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 1,240 msnm a 2,244 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [7.84, 31.44] (Tabla 8.4). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas ($R_{ci} \in [0.09, 0.22]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 21.27 h hasta 91.60 h. En cuanto a su clima, la precipitación media anual oscila desde los 413 mm a los 1,216 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 16.5$ °C; C.V. = 0.14). Así mismo, existe poca variabilidad en la D_a de mamíferos. Es decir, en esta región se encuentran cuencas hidrológicas grandes, con tiempos de respuesta muy prolongados, poca variación en precipitación y D_a de mamíferos (Figura 8.6 a Figura 8.7).

- Región 4: cuencas del centro de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 8 km² a los 10,735 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 1,641 msnm a 3,197 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [12.42, 35.87] (Tabla 8.5). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas ($R_{ci} \in [5.72, 28.60]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 0.57 h hasta 50.81 h. Debido a su ubicación en el área central y montañosa de México, la precipitación media anual oscila desde los 709 mm a los 1,745 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 15.0$ °C; C.V. = 0.16). Así mismo, existe poca variabilidad en la D_a de mamíferos, reptiles y anfibios. Es decir, en esta región se encuentran cuencas hidrológicas grandes y pequeñas, con tiempos de respuesta variados, poca variación en su precipitación y D_a de los tres grupos analizados (Figura 8.6 a Figura 8.7).

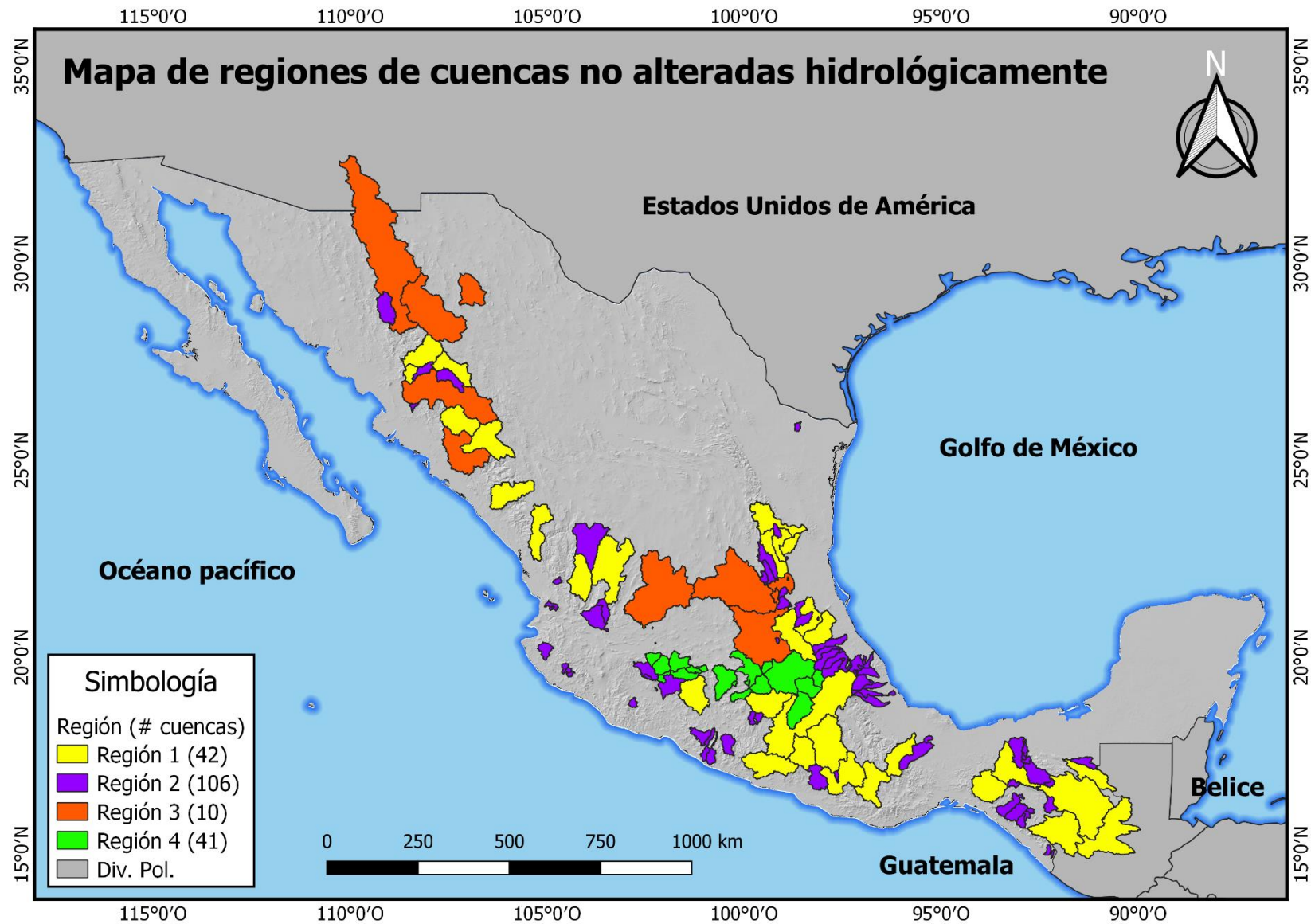


Figura 8.5 Mapa de la distribución espacial de regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

Tabla 8.2 Resumen de estadísticas para la Región 1 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 42$							
			Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V.	
Región 1: cuencas medianas y grandes de las costas	A	Área	km ²	1,625	4,803	7,857	7,879	50,635	7,522	0.96
	P	Perímetro	km	460	559	768	825	2142	309	0.40
	E _m C	Elevación media	msnm	284	1,067	1,414	1,825	2,279	486	0.34
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	6.97	11.93	14.38	17.47	18.86	3.31	0.23
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	12.42	21.93	26.81	33.01	35.87	6.46	0.24
	K _c	Coeficiente de compacidad	km/km	1.92	2.32	2.56	2.79	3.51	0.36	0.14
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.08	0.13	0.16	0.19	0.27	0.04	0.27
	RH	Relación hipsométrica	-	0.26	0.95	1.76	2.28	4.84	1.00	0.57
	T _c K	Tc Kirpich	h	13.44	21.43	29.64	33.61	70.00	12.26	0.41
	T _c C	Tc CHPBW	h	13.51	21.55	29.79	33.79	70.38	12.33	0.41
	L _c	Longitud del río principal	km	125.78	179.66	243.55	293.84	527.53	89.75	0.37
	L _a	Longitud directa del río principal	km	45.17	90.14	115.64	140.15	236.15	41.39	0.36
	S _h	Coeficiente de sinuosidad	km	1.44	1.74	2.20	2.36	3.93	0.64	0.29
	E _{máx}	Elevación máx del río principal	msnm	705	2,172	2,306	2,540	3,368	533	0.23
	E _{mín}	Elevación mín del río principal	msnm	14	86	294	466	1,260	294	1.00
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.00	0.78	4.61	7.74	11.36	3.70	0.80
	P _m	Precipitación media anual	mm	789	1,162	1,634	1,746	5,736	995	0.61
	T _m	Temperatura media anual	°C	7.2	16.7	19.2	22.0	25.0	3.7	0.19
	D _α A	D _α anfibios	-	4	7	10	14	17	4	0.40
	D _α M	D _α mamíferos	-	65	78	98	111	132	21	0.21
	D _α R	D _α reptiles	-	15	22	25	27	40	5	0.20

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q₁ – percentil 25 de los datos; Q₃ – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.3 Resumen de estadísticas para la Región 2 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 106$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 2: cuencas chicas de las costas	A	Área	km ²	5	173	899	1,377	3,242	891	0.99
	P	Perímetro	km	15	95	204	304	482	131	0.64
	E _{mC}	Elevación media	msnm	120	804	1,250	1,723	2,683	668	0.53
	M _{mC} ^o	Pendiente media de la cuenca	°	1.29	8.68	12.37	15.59	23.04	4.36	0.35
	M _{mC}	Pendiente media de la cuenca	%	2.25	15.69	22.83	28.85	44.49	8.41	0.37
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.53	1.93	2.19	2.33	3.64	0.37	0.17
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.08	0.18	0.22	0.27	0.43	0.07	0.29
	RH	Relación hipsométrica	-	0.01	0.99	1.75	2.13	6.24	1.23	0.70
	T _c K	T _c Kirpich	h	0.01	3.09	7.76	11.45	21.88	5.27	0.68
	T _c C	T _c CHPBW	h	0.01	3.10	7.80	11.51	22.00	5.29	0.68
	L _c	Longitud del río principal	km	0.14	31.43	68.54	98.81	182.23	45.14	0.66
	L _a	Longitud directa del río principal	km	3.40	21.21	41.96	59.69	115.47	26.75	0.64
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.02	1.39	1.59	1.70	3.44	0.38	0.24
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	186	1,520	1,985	2,629	4,009	811	0.41
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	1	80	488	699	2,011	499	1.02
	M _{mR}	Pendiente media del río principal	%	0.00	2.58	6.15	8.96	25.88	4.91	0.80
	P _m	Precipitación media anual	mm	382	1,219	1,736	2,021	4,782	772	0.44
	T _m	Temperatura media anual	°C	10.9	17.37	20.04	22.94	25.62	3.51	0.17
	D _α A	D _α anfibios	-	4	10	14	17	21	4	0.29
	D _α M	D _α mamíferos	-	53	97	103	112	134	15	0.15
	D _α R	D _α reptiles	-	13	23	27	31	40	6	0.21

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; T_c – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.4 Resumen de estadísticas para la Región 3 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 10$							
			Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V.	
Región 3: cuencas del altiplano – norte	A	Área	km ²	4,268	17,250	23,880	29,156	50,684	12,256	0.51
	P	Perímetro	km	491	1,244	1,448	1,637	2,682	573	0.40
	E _m C	Elevación media	msnm	1,240	1,513	1,751	2,075	2,244	346	0.20
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	4.42	8.96	10.65	11.68	16.66	4.11	0.39
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	7.84	16.41	19.62	21.41	31.44	7.88	0.40
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	2.12	2.47	2.66	2.78	3.36	0.35	0.13
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.09	0.13	0.15	0.16	0.22	0.04	0.25
	RH	Relación hipsométrica	-	0.62	1.14	1.19	1.37	1.60	0.29	0.24
	T _c K	Tc Kirpich	h	21.27	48.19	57.62	67.07	91.60	19.04	0.33
	T _c C	Tc CHPBW	h	21.38	48.45	57.93	67.43	92.09	19.15	0.33
	L _c	Longitud del río principal	km	134.53	368.34	428.95	515.19	654.86	139.46	0.33
	L _a	Longitud directa del río principal	km	72.06	166.86	182.68	208.97	258.52	50.72	0.28
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	1.86	1.92	2.36	2.70	3.37	0.58	0.24
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	2,202	2,270	2,357	2,476	2,550	132	0.06
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	17	91	477	610	1586	585	1.23
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.00	0.62	3.23	5.84	7.39	3.04	0.94
	P _m	Precipitación media anual	mm	413	707	856	1,084	1,216	265	0.31
	T _m	Temperatura media anual	°C	13.1	15.2	16.5	18.6	19.9	2.4	0.14
	D _α A	D _α anfibios	-	6	8	10	11	12	2	0.21
	D _α M	D _α mamíferos	-	68	70	74	76	85	6	0.08
	D _α R	D _α reptiles	-	22	23	25	25	35	4	0.15

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.5 Resumen de estadísticas para la Región 4 de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 41$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 4: cuencas del centro	A	Área	km ²	8	172	1,587	2,034	10,735	2,368	1.49
	P	Perímetro	km	15	100	237	316	805	195	0.83
	E _m C	Elevación media	msnm	1,641	2,185	2,390	2,581	3,197	341	0.14
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	3.27	6.59	9.04	11.88	15.58	3.11	0.34
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	5.72	11.83	16.34	21.69	28.60	5.81	0.36
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.47	1.91	2.07	2.21	2.75	0.27	0.13
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.13	0.20	0.25	0.27	0.46	0.07	0.27
	RH	Relación hipsométrica	-	0.58	1.31	2.13	2.40	5.94	1.31	0.61
	T _c K	Tc Kirpich	h	0.57	2.22	10.58	15.04	50.81	12.22	1.15
	T _c C	Tc CHPBW	h	0.58	2.23	10.64	15.12	51.08	12.29	1.15
	L _c	Longitud del río principal	km	4.51	23.41	79.73	99.76	321.13	73.11	0.92
	L _a	Longitud directa del río principal	km	3.94	21.66	43.41	58.00	129.72	31.63	0.73
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.32	1.33	1.71	1.94	3.76	0.64	0.37
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	2,053	2,611	3,115	3,600	4,369	600	0.19
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	386	1,403	1,705	2,090	2,575	509	0.30
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.00	0.00	2.44	3.51	14.04	3.62	1.48
	P _m	Precipitación media anual	mm	709	922	1,126	1,336	1,745	269	0.24
	T _m	Temperatura media anual	°C	10.1	13.1	15.0	17.0	20.0	2.4	0.16
	D _α A	D _α anfibios	-	8	12	14	15	18	2	0.14
	D _α M	D _α mamíferos	-	70	84	89	92	112	9	0.10
	D _α R	D _α reptiles	-	21	24	28	31	36	4	0.14

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; T_c – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.6 Matriz de correlación entre las variables seleccionadas para la regionalización de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

	A	P	E _m C	M _m C ^o	M _m C	K _c	R _{ci}	RH	L _c	L _a	S _h	E _{max}	E _{min}	M _m R	T _c K	T _c C	P _m	T _m	D _a A	D _a M	D _a R
A	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	0.94	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E_mC	0.05	0.01	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_mC^o	0.03	0.09	-0.02	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_mC	0.03	0.10	-0.02	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K_c	0.42	0.58	-0.13	0.03	0.04	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R_{ci}	-0.39	-0.55	0.11	-0.03	-0.04	-0.94	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RH	-0.03	0.00	-0.25	-0.28	-0.28	-0.02	0.03	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L_c	0.87	0.97	-0.01	0.11	0.11	0.60	-0.58	0.02	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L_a	0.81	0.93	-0.02	0.12	0.13	0.63	-0.61	0.04	0.95	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S_h	0.39	0.49	-0.02	0.09	0.09	0.25	-0.28	0.00	0.55	0.35	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E_{max}	0.04	0.07	0.80	0.12	0.12	0.08	-0.07	-0.05	0.08	0.12	-0.06	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E_{min}	-0.18	-0.28	0.80	-0.37	-0.38	-0.35	0.36	0.01	-0.31	-0.35	-0.16	0.52	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
M_mR	-0.14	-0.17	0.01	0.29	0.29	-0.04	0.08	-0.27	-0.17	-0.19	-0.15	0.02	-0.08	1.00	-	-	-	-	-	-	-
T_cK	0.88	0.95	-0.01	0.00	0.00	0.56	-0.53	0.06	0.98	0.91	0.56	0.00	-0.23	-0.20	1.00	-	-	-	-	-	-
T_cC	0.88	0.95	-0.01	0.00	0.00	0.56	-0.53	0.06	0.98	0.91	0.56	0.00	-0.23	-0.20	1.00	1.00	-	-	-	-	-
P_m	-0.15	-0.11	-0.43	0.15	0.15	0.16	-0.12	0.12	-0.07	-0.07	-0.07	-0.17	-0.38	0.27	-0.11	-0.11	1.00	-	-	-	-
T_m	-0.09	-0.06	-0.88	0.04	0.04	0.07	-0.05	0.28	-0.04	-0.02	0.01	-0.66	-0.67	-0.17	-0.04	-0.04	0.40	1.00	-	-	-
D_aA	-0.17	-0.20	-0.02	-0.36	-0.36	-0.04	0.09	-0.03	-0.18	-0.22	-0.09	-0.12	0.09	0.23	-0.13	-0.13	0.04	-0.07	1.00	-	-
D_aM	-0.25	-0.23	-0.34	-0.05	-0.05	0.00	0.00	0.13	-0.21	-0.20	-0.04	-0.21	-0.22	0.14	-0.22	-0.22	0.54	0.39	0.12	1.00	-
D_aR	-0.32	-0.39	-0.07	-0.26	-0.26	-0.18	0.21	0.11	-0.36	-0.38	-0.21	0.02	0.08	0.21	-0.34	-0.34	0.30	0.07	0.57	0.43	1.00

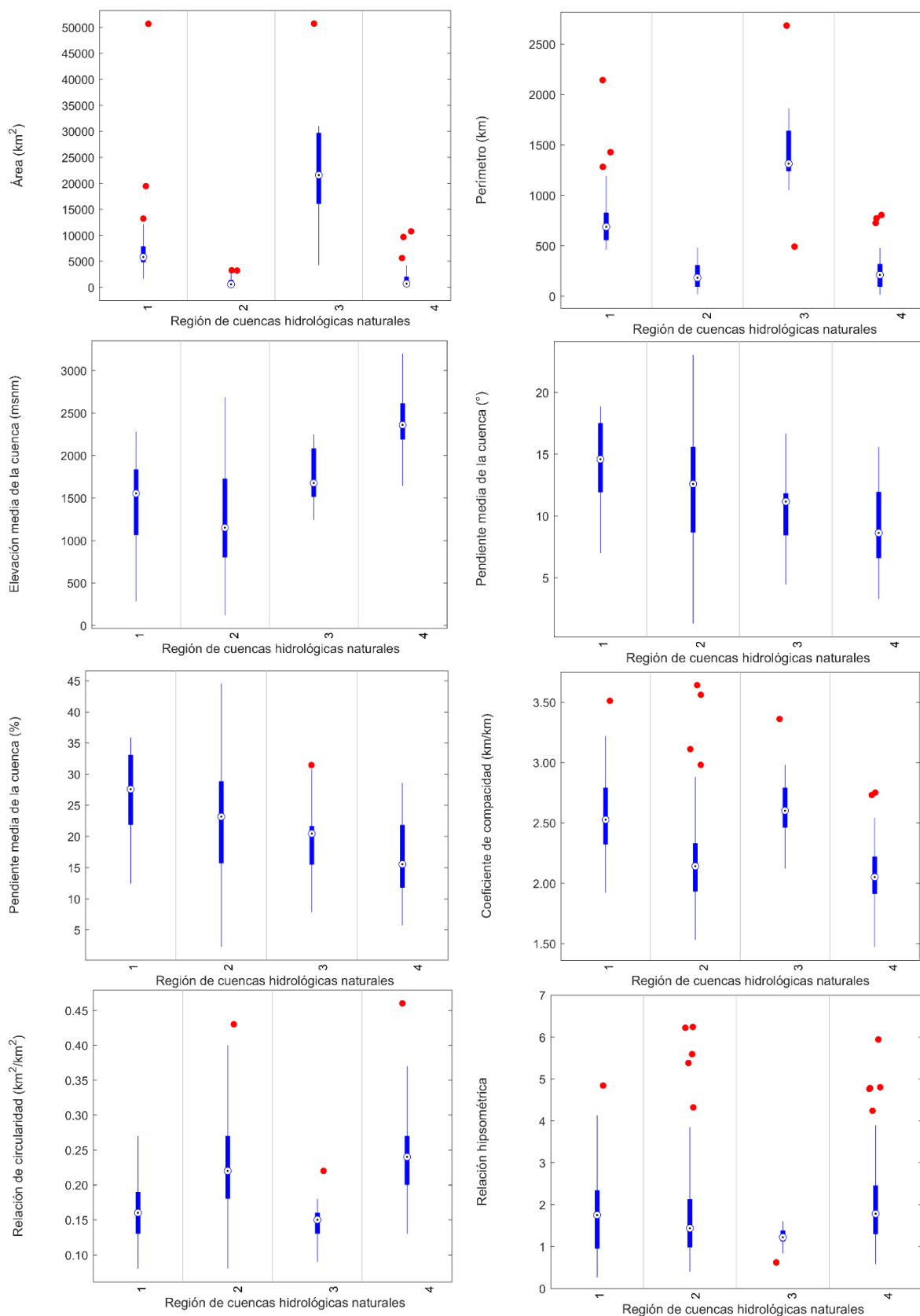


Figura 8.6 Variabilidad de parámetros fisiográficos de las regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

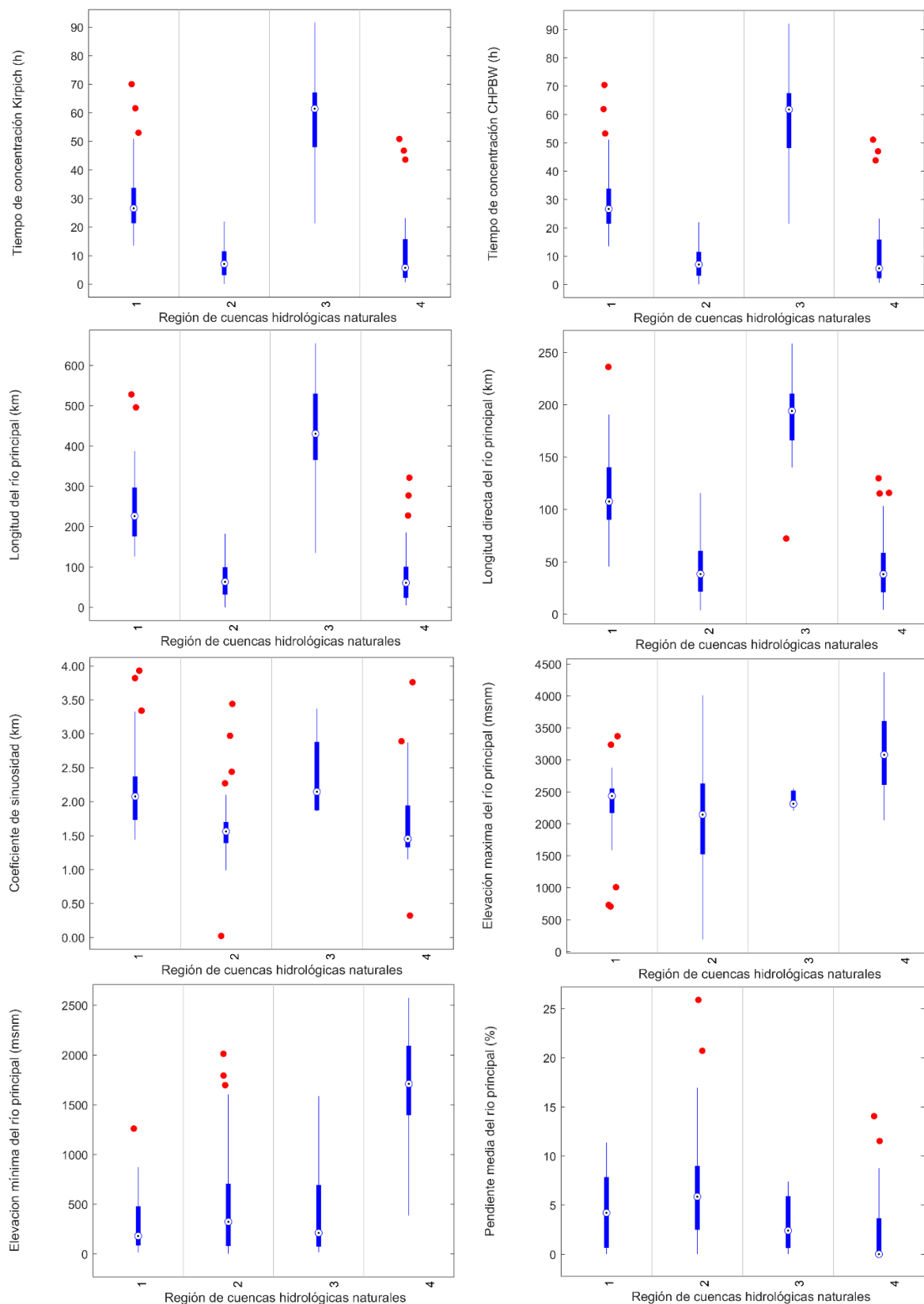


Figura 8.6 (Cont.) Variabilidad de parámetros fisiográficos de las regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

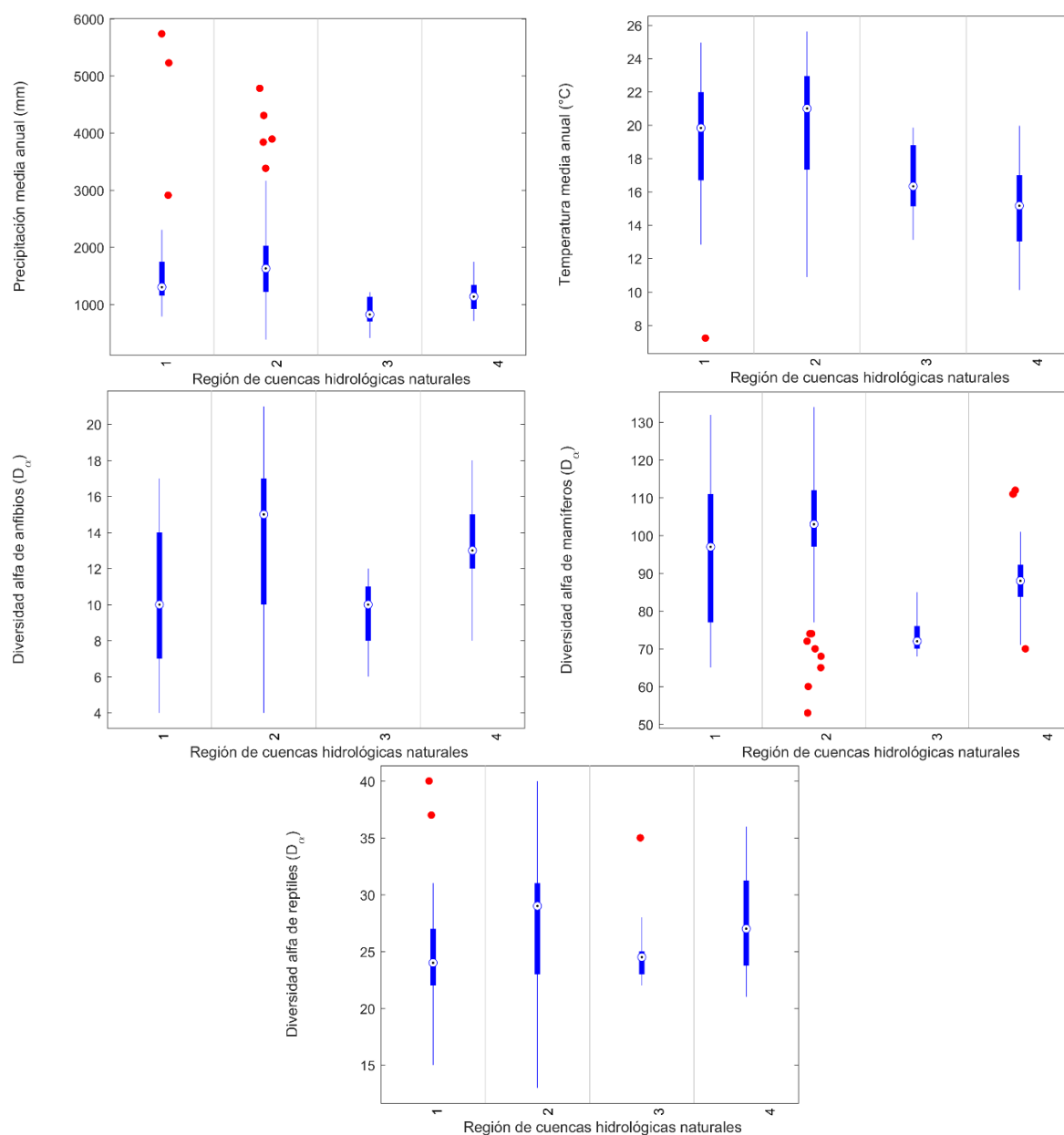


Figura 8.7 Variabilidad de parámetros climáticos y ecológicos de las regiones de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico.

Cuencas alteradas en su régimen hidrológico

Las cuencas alteradas en su régimen hidrológico fueron clasificadas en cinco grupos con características homogéneas. El procedimiento se repitió desde dos grupos de cuencas hasta quince grupos. Posteriormente, se estimó el índice silhouette (S) para conocer las variaciones entre elementos de cada uno de éstos (Figura 8.8). De este análisis se seleccionaron cinco grupos óptimos de cuencas hidrológicas con una valoración $S = 0.61$.

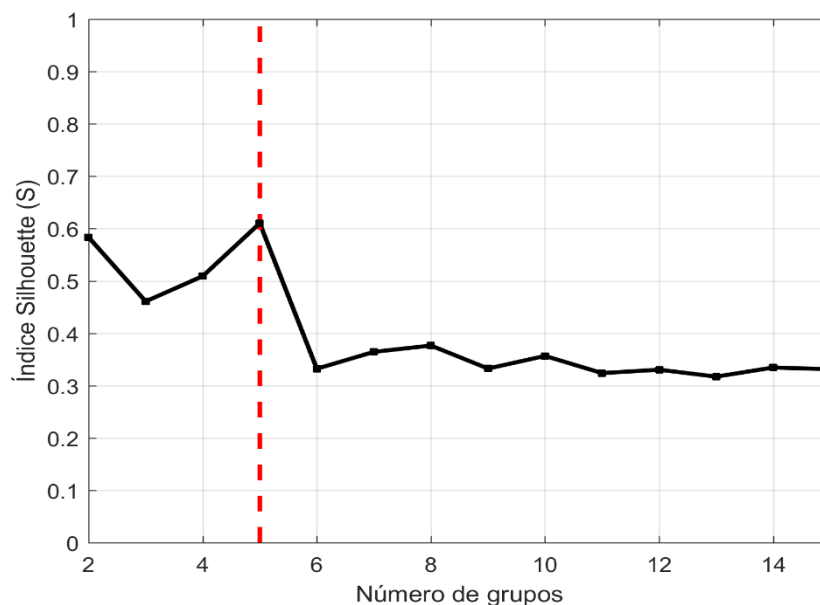


Figura 8.8 Validación del número óptimo de regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

De la distribución espacial de los *clusters* obtenidos (Figura 8.9) se definen las siguientes regiones homogéneas:

- Región 1: cuencas del centro de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 6 km² a los 21,253 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 1,437 msnm a 3,420 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [2.68, 39.58] (Tabla 8.7). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas y ovaladas ($R_{ci} \in [0.11, 0.49]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 0.01 h hasta 67.32 h. En cuanto a su clima, la precipitación media anual oscila desde los 264 mm a los 2,002 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 15.6$ °C; C.V. = 0.16). Así mismo, existe poca variabilidad en la D_a de mamíferos y reptiles más no en anfibios.

En cuanto al estado de su alteración hidrológica, se observó que existen cuencas propensas a la rehabilitación en el corto plazo dentro de esta región. Lo anterior se justifica por los valores obtenidos en el cuantil 75 de los índices de alteración global para valores habituales (IAHG1, $p_{75} = 0.64$), para eventos extremos máximos (IAHG2, $p_{75} = 0.61$) y mínimos (IAHG3, $p_{75} = 0.79$).

Por su parte socioeconómica, estas cuencas muestran una variación en la densidad de población importante, misma que oscila entre los 2,877 hab/km² hasta 1,372,204 hab/km². Su producto interno bruto (PIB en \$/km²) se encuentra dentro del intervalo [19,234, 126,946] con índices de desarrollo humano (IDH) entre 0.08 a 0.88. Su disponibilidad natural per cápita varía entre

los 44 m³/año hasta 23,273 m³/año. Esta región es importante para la economía mexicana ya que es la segunda con mayor aporte al PIB de la nación (Figura 8.10 a Figura 8.12).

- Región 2: cuencas del altiplano y norte de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 9 km² a los 79,765 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 625 msnm a 2,241 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [3.07, 39.80] (Tabla 8.8). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas y ovaladas ($R_{ci} \in [0.09, 0.41]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 0.59 h hasta 127.26 h. En cuanto a su clima, la precipitación media anual oscila desde los 122 mm a los 2,996 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 18.3$ °C; C.V. = 0.12). Así mismo, existe poca variabilidad en la D_α de mamíferos y reptiles más no en anfibios.

En cuanto al estado de su alteración hidrológica, se observó que existen cuencas propensas a la rehabilitación en el corto plazo dentro de esta región, pero en menor cantidad que la región 1. Lo anterior se justifica por los valores obtenidos en el cuantil 75 de los índices de alteración global para valores habituales (IAHG1, $p_{75} = 0.61$), para eventos extremos máximos (IAHG2, $p_{75} = 0.52$) y mínimos (IAHG3, $p_{75} = 0.68$).

Por su parte socioeconómica, estas cuencas muestran una variación en la densidad de población importante, misma que oscila entre los 3,719 hab/km² hasta 1,307,680 hab/km². Su PIB (\$/km²) se encuentra dentro del intervalo [25,980, 112,008] con IDHs entre 0.58 a 0.84. Su disponibilidad natural per cápita varía entre los 18 m³/año hasta 31,779 m³/año. Esta región es importante para la economía mexicana y muestra un IDHs con menor variación comparados con la región anterior (Figura 8.10 a Figura 8.12).

- Región 3: cuencas de la costa este.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 11 km² a los 19,685 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 31 msnm a 2,347 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [1.67, 33.09] (Tabla 8.9). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas ($R_{ci} \in [0.10, 0.38]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 0.28 h hasta 100.27 h. En cuanto a su clima, la precipitación media anual oscila desde los 124 mm a los 2,946 mm. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 20.9$ °C; C.V. = 0.15). En esta región existe poca variabilidad en la D_α reptiles.

En cuanto al estado de su alteración hidrológica, se observó que dentro de esta región existe una mayor cantidad de cuencas propensas a la rehabilitación en el corto plazo. Lo anterior se

justifica por los valores obtenidos en el cuantil 75 de los índices de alteración global para valores habituales (IAHG1, $p_{75} = 0.74$), para eventos extremos máximos (IAHG2, $p_{75} = 0.73$) y mínimos (IAHG3, $p_{75} = 0.95$).

Por su parte socioeconómica, estas cuencas muestran una variación en la densidad de población menor que en las regiones previas, misma que oscila entre los 2,542 hab/km² hasta 784,342 hab/km². Su PIB (\$/km²) se encuentra dentro del intervalo [21,457, 133,115] con IDHs entre 0.48 a 0.84. Su disponibilidad natural per cápita varía entre 1 m³/año hasta 21,105 m³/año. Esta región es la de mayor aporte al PIB de la nación (Figura 8.10 a Figura 8.12).

- Región 4: cuencas de la selva de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 69 km² a los 38,359 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 182 msnm a 2,190 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [5.88, 41.53] (Tabla 8.10). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas ($R_{ci} \in [0.08, 0.37]$) con tiempos de concentración de Kirpich desde 0.03 h hasta 73.38 h. En cuanto a su clima, la precipitación media anual oscila desde los 1,199 mm a los 6,313 mm, siendo la región con mayor cantidad de agua precipitada. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 21.1$ °C; C.V. = 0.14). Estas condiciones climáticas muestran poca variabilidad en la diversidad alfa (D_α) de mamíferos.

En cuanto al estado de su alteración hidrológica, se observó que esta región de cuencas contiene una gran parte de cuencas inconclusas. Por tanto, se recomienda habilitar las estaciones hidrométricas de la zona, ampliar su red de aforo y mejorar la calidad estadística de la información.

Por su parte socioeconómica, estas cuencas muestran la menor densidad de población, misma que oscila entre los 14,089 hab/km² hasta 198,877 hab/km². Su PIB (\$/km²) se encuentra dentro del intervalo [17,221, 55,915] con IDHs entre 0.56 a 0.76. Su disponibilidad natural per cápita varía entre 1,436 m³/año hasta 35,705 m³/año. Esta región es la de menor densidad poblacional, menor aporte al PIB de la nación y la de mayor disponibilidad natural per cápita (Figura 8.10 a Figura 8.12).

- Región 5: cuencas de la costa oeste de México.

El área de este grupo de cuencas oscila entre los 7 km² a los 115,269 km², la elevación media de la cuenca varía entre los 292 msnm a 2,457 msnm mientras que la pendiente media (%) se encuentra dentro del intervalo [4.52, 43.06] (Tabla 8.11). La forma de las cuencas es variada, pero predominan cuencas alargadas y ovaladas ($R_{ci} \in [0.12, 0.44]$) con tiempos de

concentración de Kirpich desde 0.02 h hasta 133.14 h. Respecto a su clima, la precipitación media anual oscila desde los 481 mm a los 2,413 mm. Por otro lado, la temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x} = 21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; C.V. = 0.12). Así mismo, existe poca variabilidad en la D_{α} de mamíferos.

En cuanto al estado de su alteración hidrológica, se observó que dentro de esta región existe una mayor cantidad de cuencas propensas a la rehabilitación en el corto plazo. Lo anterior se justifica por los valores obtenidos en el cuantil 75 de los índices de alteración global para valores habituales (IAHG1, $p_{75} = 0.84$), para eventos extremos máximos (IAHG2, $p_{75} = 0.74$) y mínimos (IAHG3, $p_{75} = 0.97$).

Por su parte socioeconómica, estas cuencas muestran una variación en la densidad de población menor que en las regiones previas, misma que oscila entre los 2,407 hab/km² hasta 735,281 hab/km². Su PIB (\$/km²) se encuentra dentro del intervalo [19,798, 88,742] con IDHs entre 0.23 a 0.80. Su disponibilidad natural per cápita varía entre 175 m³/año hasta 19,432 m³/año. Esta es la segunda región con menor aporte al PIB de la nación (Figura 8.10 a Figura 8.12).

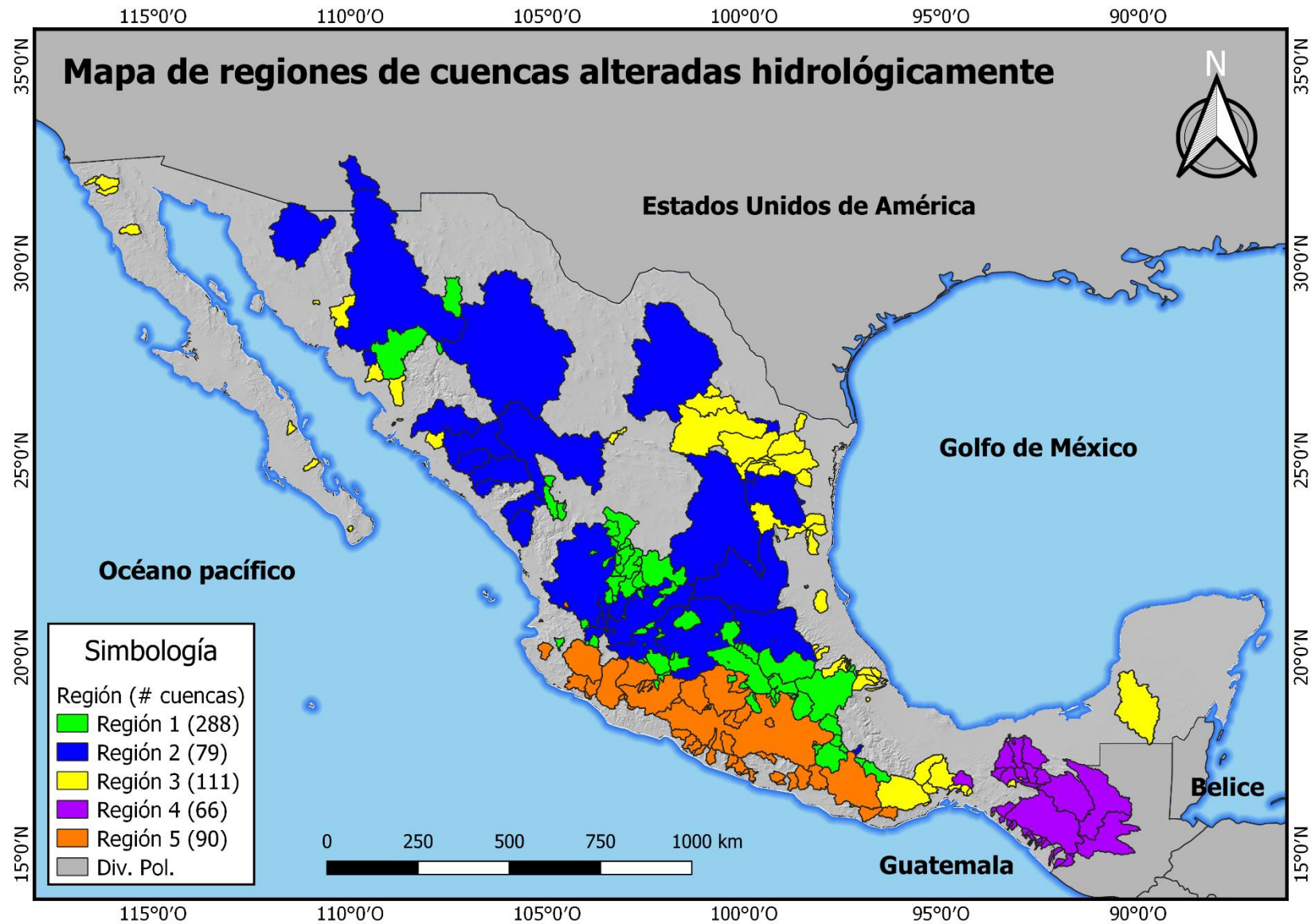


Figura 8.9 Mapa de la distribución espacial de regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

Tabla 8.7 Resumen de estadísticas para la Región 1 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 288$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 1: cuencas del centro – norte	A	Área	km ²	6	109	2,037	2,053	21,253	3,691	1.81
	P	Perímetro	km	15	75	254	342	1,405	268	1.06
	E _m C	Elevación media	msnm	1,437	2,069	2,289	2,535	3,420	330	0.14
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	1.53	6.03	8.42	10.20	21.05	3.56	0.42
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	2.68	10.78	15.19	18.37	39.58	6.66	0.44
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.43	1.87	2.09	2.29	3.04	0.29	0.14
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.11	0.19	0.24	0.28	0.49	0.06	0.27
	RH	Relación hipsométrica	-	0.33	1.17	1.90	2.30	7.12	1.12	0.59
	T _c K	Tc Kirpich	h	0.01	2.59	12.03	13.84	67.32	15.41	1.28
	T _c C	Tc CHPBW	h	0.01	2.60	12.10	13.92	67.68	15.49	1.28
	L _c	Longitud del río principal	km	0.14	22.91	80.13	100.39	423.94	91.33	1.14
	L _a	Longitud directa del río principal	km	2.18	17.01	43.98	55.09	222.19	40.80	0.93
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.01	1.31	1.62	1.89	3.87	0.57	0.35
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	1,791	2,384	2,773	2,963	4,729	559	0.20
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	504	1,588	1,791	1,996	3,294	399	0.22
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.93	2.09	4.23	5.79	16.10	2.80	0.66
	P _m	Precipitación media anual	mm	264	731	941	1,083	2,002	322	0.34
	T _m	Temperatura media anual	°C	8.4	13.9	15.6	17.2	25.8	2.4	0.16
	D _α A	D _α anfibios	-	5	10	12	13	22	3	0.24
	D _α M	D _α mamíferos	-	63	71	84	92	130	14	0.16
	D _α R	D _α reptiles	-	16	23	26	28	41	4	0.17

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.7 (Cont.) estadísticas para la Región 1 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidad	Estadísticos para $N = 288$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 1: cuencas del centro – norte	IAH1	I. aportación anual	-	0.01	0.26	0.46	0.64	0.97	0.24	0.52
	IAH2	I. aportación mensual	-	0.12	0.29	0.45	0.61	0.91	0.19	0.43
	IAH3	I. variabilidad habitual	-	0.26	0.40	0.58	0.79	0.95	0.21	0.37
	IAH4	I. variabilidad extrema	-	0.01	0.31	0.46	0.63	0.89	0.22	0.49
	IAH5	I. máximos estacionalidad	-	0.33	0.67	0.79	1.00	1.00	0.22	0.28
	IAH6	I. mínimos estacionalidad	-	0.17	0.71	0.83	1.00	1.00	0.28	0.34
	IAH7	I. avenidas máximas	-	0.02	0.32	0.49	0.67	0.96	0.25	0.51
	IAH8	I. caudal generador de lecho	-	0.17	0.57	0.68	0.83	0.99	0.20	0.30
	IAH9	I. caudal de conectividad	-	0.01	0.06	0.24	0.34	0.79	0.22	0.93
	IAH10	I. avenidas habituales	-	0.06	0.32	0.49	0.66	0.97	0.24	0.50
	IAH11	I. variabilidad avenidas máx.	-	0.19	0.42	0.59	0.76	0.96	0.21	0.36
	IAH12	I. variabilidad avenidas hab.	-	0.15	0.41	0.58	0.76	1.00	0.23	0.39
	IAH13	I. duración de avenidas	-	0.10	0.35	0.52	0.65	1.00	0.21	0.41
	IAH14	I. avenidas estacionalidad	-	0.02	0.25	0.43	0.62	0.87	0.25	0.58
	IAH15	I. sequías extremas	-	0.01	0.21	0.47	0.74	1.00	0.34	0.72
	IAH16	I. sequías habituales	-	0.04	0.18	0.36	0.48	1.00	0.24	0.66
	IAH17	I. variabilidad sequía extrema	-	0.21	0.44	0.59	0.80	0.97	0.22	0.38
	IAH18	I. variabilidad sequía habitual	-	0.33	0.53	0.68	0.83	1.00	0.19	0.29
	IAH19	I. duración de sequías	-	0.11	0.37	0.60	0.84	0.98	0.27	0.45
	IAH20	I. no. de días con $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	-	0.02	0.14	0.44	0.80	1.00	0.36	0.83
	IAH21	I. sequías estacionalidad	-	0.03	0.07	0.17	0.26	0.52	0.13	0.75
	IAG1	I. global val. habituales	-	0.01	0.26	0.46	0.64	0.97	0.24	0.52
	IAG2	I. global extremos máx.	-	0.12	0.29	0.45	0.61	0.91	0.19	0.43
	IAG3	I. global extremos mín.	-	0.26	0.40	0.58	0.79	0.95	0.21	0.37

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; IAH – índice de alteración hidrológica; IAG – índice de alteración hidrológica global.

Tabla 8.7 (Cont.) estadísticas para la Región 1 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	U.	Estadísticos para $N = 288$						
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V
Región 1: cuencas del centro – norte	Dn Disponibilidad natural media per cápita	m ³ /año	44	340	1,418	1,653	23,273	2,343	1.65
	IDH Índice de desarrollo humano	-	0.08	0.69	0.72	0.75	0.88	0.07	0.09
	PIB Producto interno bruto	\$/km ²	19,234	37,469	48,755	54,975	126,946	17,242	0.35
	PEA Población económica activa	hab	928	7,716	54,595	57,744	591,495	91,860	1.68
	Pob Densidad de población	hab/km ²	2,877	22,177	135,236	154,803	1,372,204	215,794	1.60
	P ⁺ % de AA por incrementos en prec.	%	0.20	30.48	59.26	91.82	100.00	33.34	0.6
	P ⁻ % de AA por decrementos en prec.	%	0.20	15.00	42.92	69.84	100.00	32.11	0.7
	T _m ⁺ % de AA por incrementos en temp. med.	%	0.53	32.97	65.64	98.27	100.00	34.16	0.5
	T _m ⁻ % de AA por decrementos en temp. med.	%	0.06	1.43	9.25	13.27	98.68	12.77	1.4
	T _x ⁺ % de AA por incrementos en temp. máx.	%	0.10	4.12	21.30	30.60	100.00	24.91	1.2
	T _x ⁻ % de AA por decrementos en temp. máx.	%	0.07	31.36	63.40	96.08	100.00	34.34	0.5
	T _n ⁺ % de AA por incrementos en temp. mín.	%	1.28	27.12	56.05	89.30	100.00	32.90	0.6
	T _n ⁻ % de AA por decrementos en temp. mín.	%	0.06	6.47	35.50	53.82	100.00	30.37	0.9
	S ⁺ % de AA por incrementos en dur. de sequía	%	0.04	9.02	37.98	60.46	100.00	33.84	0.9
	S ⁻ % de AA por decrementos en dur. de sequía	%	0.01	0.06	5.23	3.03	57.12	12.41	2.4
	Acc % de AA por cambio climático	%	9.28	86.58	90.91	100.00	100.00	14.70	0.2

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; U – unidades; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; temp. – temperatura; dur. – duración y AA – área afectada de la superficie total de la cuenca hidrológica.

Tabla 8.8 Resumen de estadísticas para la Región 2 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 79$							
			Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V.	
Región 2: Cuencas del altiplano – norte	A	Área	km ²	9	852	12,885	22,364	79,765	16,616	1.29
	P	Perímetro	km	19	243	842	1,482	2,619	742	0.88
	E _m C	Elevación media	msnm	625	1,211	1,479	1,814	2,241	422	0.29
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	1.74	7.64	12.09	16.68	20.48	5.00	0.41
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	3.07	13.84	22.50	31.24	39.80	9.70	0.43
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.57	2.02	2.42	2.75	3.32	0.45	0.18
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.09	0.13	0.19	0.25	0.41	0.07	0.39
	RH	Relación hipsométrica	-	-0.06	0.85	1.69	1.76	5.48	1.30	0.77
	T _c K	Tc Kirpich	h	0.59	6.61	34.09	61.74	127.26	33.34	0.98
	T _c C	Tc CHPBW	h	0.59	6.65	34.28	62.07	127.94	33.52	0.98
	L _c	Longitud del río principal	km	5.36	72.92	248.84	443.85	731.59	207.73	0.83
	L _a	Longitud directa del río principal	km	4.72	46.74	115.74	173.19	324.21	86.00	0.74
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.80	1.57	1.92	2.19	3.52	0.56	0.29
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	1,159	1,972	2,245	2,515	3,029	449	0.20
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	15	108	551	1,031	1,540	480	0.87
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.91	3.88	6.41	8.34	14.89	3.56	0.56
	P _m	Precipitación media anual	mm	122	789	1,167	1,244	2,996	651	0.56
	T _m	Temperatura media anual	°C	14.2	16.6	18.3	20.1	22.6	2.2	0.12
	D _α A	D _α anfibios	-	4	9	11	12	21	4	0.38
	D _α M	D _α mamíferos	-	63	69	81	89	111	15	0.18
	D _α R	D _α reptiles	-	20	26	29	32	42	4	0.15

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q₁ – percentil 25 de los datos; Q₃ – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.8 (Cont.) estadísticas para la Región 2 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidad	Estadísticos para $N = 79$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 2: Cuencas del altiplano – norte	IAH1	I. aportación anual	-	0.11	0.45	0.52	0.61	0.88	0.19	0.37
	IAH2	I. aportación mensual	-	0.08	0.42	0.43	0.52	0.62	0.14	0.33
	IAH3	I. variabilidad habitual	-	0.18	0.34	0.53	0.68	0.86	0.21	0.39
	IAH4	I. variabilidad extrema	-	0.16	0.36	0.48	0.60	0.95	0.18	0.38
	IAH5	I. máximos estacionalidad	-	0.17	0.37	0.61	0.83	0.83	0.28	0.46
	IAH6	I. mínimos estacionalidad	-	0.17	0.37	0.70	1.00	1.00	0.34	0.49
	IAH7	I. avenidas máximas	-	0.10	0.34	0.50	0.66	0.82	0.20	0.40
	IAH8	I. caudal generador de lecho	-	0.34	0.66	0.73	0.85	0.97	0.16	0.22
	IAH9	I. caudal de conectividad	-	0.07	0.11	0.41	0.65	0.79	0.31	0.77
	IAH10	I. avenidas habituales	-	0.25	0.38	0.57	0.75	0.96	0.24	0.42
	IAH11	I. variabilidad avenidas máx.	-	0.10	0.33	0.54	0.71	0.97	0.25	0.46
	IAH12	I. variabilidad avenidas hab.	-	0.17	0.32	0.51	0.64	0.95	0.25	0.49
	IAH13	I. duración de avenidas	-	0.10	0.26	0.47	0.63	0.89	0.25	0.54
	IAH14	I. avenidas estacionalidad	-	0.07	0.38	0.44	0.62	0.75	0.20	0.45
	IAH15	I. sequías extremas	-	0.02	0.11	0.47	0.74	1.00	0.38	0.81
	IAH16	I. sequías habituales	-	0.01	0.13	0.39	0.62	0.80	0.29	0.73
	IAH17	I. variabilidad sequía extrema	-	0.25	0.36	0.52	0.71	0.86	0.21	0.41
	IAH18	I. variabilidad sequía habitual	-	0.16	0.34	0.54	0.68	0.98	0.24	0.45
	IAH19	I. duración de sequías	-	0.25	0.44	0.59	0.73	0.93	0.21	0.35
	IAH20	I. no. de días con $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	-	0.25	0.80	0.77	0.93	1.00	0.25	0.33
	IAH21	I. sequías estacionalidad	-	0.02	0.11	0.30	0.42	0.70	0.23	0.76
IAG1	I. global val. habituales	-	0.11	0.45	0.52	0.61	0.88	0.19	0.37	
IAG2	I. global extremos máx.	-	0.08	0.42	0.43	0.52	0.62	0.14	0.33	
IAG3	I. global extremos mín.	-	0.18	0.34	0.53	0.68	0.86	0.21	0.39	

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; IAH – índice de alteración hidrológica; IAG – índice de alteración hidrológica global.

Tabla 8.8 (Cont.) estadísticas para la Región 2 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	U.	Estadísticos para $N = 79$							
			Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V	
Región 2: Cuencas del altiplano – norte	Dn	Disponibilidad natural media per cápita	m ³ /año	18	1,892	6,042	7,254	31,779	6,673	1.10
	IDH	Índice de desarrollo humano	-	0.58	0.67	0.71	0.75	0.84	0.06	0.09
	PIB	Producto interno bruto	\$/km ²	25,980	32,520	47,215	55,715	112,008	19,299	0.41
	PEA	Población económica activa	hab	1,330	5,781	45,717	25,386	594,591	115,671	2.53
	Pob	Densidad de población	hab/km ²	3,719	19,257	107,358	68,225	1,307,680	252,879	2.36
	P ⁺	% de AA por incrementos en prec.	%	3.61	21.30	43.93	64.77	100.00	30.62	0.7
	P ⁻	% de AA por decrementos en prec.	%	0.27	14.98	45.19	73.88	100.00	31.91	0.7
	T _m ⁺	% de AA por incrementos en temp. med.	%	1.60	51.07	66.85	82.67	100.00	24.59	0.4
	T _m ⁻	% de AA por decrementos en temp. med.	%	0.04	1.28	4.71	4.31	30.49	6.49	1.4
	T _x ⁺	% de AA por incrementos en temp. máx.	%	0.03	1.91	12.16	17.34	91.78	14.92	1.2
	T _x ⁻	% de AA por decrementos en temp. máx.	%	22.20	61.47	73.30	89.98	100.00	22.06	0.3
	T _n ⁺	% de AA por incrementos en temp. mín.	%	0.83	30.73	46.11	63.19	100.00	23.78	0.5
	T _n ⁻	% de AA por decrementos en temp. mín.	%	0.26	9.51	29.74	42.49	82.90	23.79	0.8
	S ⁺	% de AA por incrementos en dur. de sequía	%	0.23	21.09	42.06	61.49	100.00	29.42	0.7
	S ⁻	% de AA por decrementos en dur. de sequía	%	0.01	0.07	0.25	0.27	0.92	0.29	1.1
	Acc	% de AA por cambio climático	%	52.68	73.39	84.05	95.95	100.00	13.75	0.2

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; U – unidades; Q₁ – percentil 25 de los datos; Q₃ – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; temp. – temperatura; dur. – duración y AA – área afectada de la superficie total de la cuenca hidrológica.

Tabla 8.9 Resumen de estadísticas para la Región 3 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 111$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 3: cuencas de la costa este	A	Área	km ²	11	271	3,155	3,396	19,685	4,801	1.52
	P	Perímetro	km	20	136	352	441	1,374	330	0.94
	E _m C	Elevación media	msnm	31	432	901	1,286	2,347	554	0.62
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	0.95	6.77	9.74	13.97	17.77	4.68	0.48
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	1.67	12.28	17.94	26.13	33.09	8.80	0.49
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.63	1.93	2.18	2.33	3.23	0.35	0.16
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.10	0.19	0.22	0.27	0.38	0.06	0.27
	RH	Relación hipsométrica	-	-1.00	1.38	2.63	3.20	12.40	2.03	0.77
	T _c K	Tc Kirpich	h	0.28	5.67	16.95	25.84	100.27	16.81	0.99
	T _c C	Tc CHPBW	h	0.28	5.70	17.04	25.98	100.80	16.90	0.99
	L _c	Longitud del río principal	km	4.00	40.45	117.49	149.49	471.47	108.38	0.92
	L _a	Longitud directa del río principal	km	5.65	26.95	65.67	90.11	251.67	54.85	0.84
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.09	1.45	1.73	1.96	4.14	0.48	0.28
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	116	1,011	1,474	1,781	3,030	726	0.49
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	3	64	271	387	1,110	266	0.98
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.01	1.59	4.34	5.79	23.68	3.92	0.90
	P _m	Precipitación media anual	mm	124	527	1,027	1,282	2,946	570	0.55
	T _m	Temperatura media anual	°C	12.2	19.2	20.9	23.2	26.8	3.2	0.15
	D _α A	D _α anfibios	-	2	10	12	14	20	4	0.32
	D _α M	D _α mamíferos	-	39	68	87	110	136	26	0.30
	D _α R	D _α reptiles	-	9	30	32	36	49	6	0.19

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.9 (Cont.) estadísticas para la Región 3 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidad	Estadísticos para $N = 111$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 3: cuencas de la costa este	IAH1	I. aportación anual	-	0.06	0.15	0.30	0.45	0.74	0.20	0.67
	IAH2	I. aportación mensual	-	0.07	0.14	0.28	0.39	0.73	0.19	0.66
	IAH3	I. variabilidad habitual	-	0.20	0.40	0.57	0.83	0.95	0.25	0.44
	IAH4	I. variabilidad extrema	-	0.04	0.16	0.34	0.52	0.87	0.24	0.73
	IAH5	I. máximos estacionalidad	-	0.50	0.75	0.86	1.00	1.00	0.18	0.21
	IAH6	I. mínimos estacionalidad	-	0.33	0.67	0.78	1.00	1.00	0.24	0.30
	IAH7	I. avenidas máximas	-	0.06	0.12	0.33	0.52	0.72	0.23	0.71
	IAH8	I. caudal generador de lecho	-	0.26	0.41	0.59	0.77	0.98	0.25	0.43
	IAH9	I. caudal de conectividad	-	0.03	0.05	0.13	0.21	0.33	0.11	0.80
	IAH10	I. avenidas habituales	-	0.04	0.10	0.36	0.53	0.91	0.31	0.85
	IAH11	I. variabilidad avenidas máx.	-	0.09	0.34	0.54	0.71	0.99	0.26	0.49
	IAH12	I. variabilidad avenidas hab.	-	0.26	0.50	0.62	0.76	0.95	0.20	0.31
	IAH13	I. duración de avenidas	-	0.12	0.34	0.47	0.67	0.93	0.24	0.51
	IAH14	I. avenidas estacionalidad	-	0.17	0.47	0.56	0.73	0.83	0.19	0.34
	IAH15	I. sequías extremas	-	0.03	0.06	0.50	1.00	1.00	0.45	0.90
	IAH16	I. sequías habituales	-	0.05	0.12	0.39	0.53	0.97	0.30	0.78
	IAH17	I. variabilidad sequía extrema	-	0.08	0.36	0.67	1.00	1.00	0.34	0.50
	IAH18	I. variabilidad sequía habitual	-	0.15	0.34	0.49	0.64	0.93	0.22	0.45
	IAH19	I. duración de sequías	-	0.09	0.43	0.63	0.85	0.93	0.26	0.41
	IAH20	I. no. de días con $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	-	0.07	0.17	0.53	0.90	1.00	0.41	0.77
	IAH21	I. sequías estacionalidad	-	0.03	0.09	0.31	0.52	0.75	0.25	0.81
	IAG1	I. global val. habituales	-	0.06	0.15	0.30	0.45	0.74	0.20	0.67
	IAG2	I. global extremos máx.	-	0.07	0.14	0.28	0.39	0.73	0.19	0.66
	IAG3	I. global extremos mín.	-	0.20	0.40	0.57	0.83	0.95	0.25	0.44

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; IAH – índice de alteración hidrológica; IAG – índice de alteración hidrológica global.

Tabla 8.9 (Cont.) estadísticas para la Región 3 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	U.	Estadísticos para $N = 111$						
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V
Región 3: cuencas de la costa este	Dn Disponibilidad natural media per cápita	m ³ /año	1	446	2,903	3,866	21,105	3,503	1.21
	IDH Índice de desarrollo humano	-	0.48	0.68	0.72	0.78	0.84	0.07	0.10
	PIB Producto interno bruto	\$/km ²	21,457	34,172	52,131	65,699	133,115	23,999	0.46
	PEA Población económica activa	hab	908	5,563	36,802	34,838	345,709	63,852	1.74
	Pob Densidad de población	hab/km ²	2,542	16,106	88,723	97,536	784,342	144,821	1.63
	P ⁺ % de AA por incrementos en prec.	%	0.04	27.68	50.70	81.88	100.00	31.24	0.6
	P ⁻ % de AA por decrementos en prec.	%	0.35	25.04	53.05	86.38	100.00	32.67	0.6
	T _m ⁺ % de AA por incrementos en temp. med.	%	0.59	23.71	55.05	83.02	100.00	33.09	0.6
	T _m ⁻ % de AA por decrementos en temp. med.	%	0.16	3.05	16.37	22.48	100.00	22.56	1.4
	T _x ⁺ % de AA por incrementos en temp. máx.	%	0.06	3.15	32.58	51.70	100.00	33.99	1.0
	T _x ⁻ % de AA por decrementos en temp. máx.	%	1.55	31.28	58.61	90.22	100.00	32.21	0.5
	T _n ⁺ % de AA por incrementos en temp. mín.	%	0.05	11.73	37.05	55.17	100.00	29.38	0.8
	T _n ⁻ % de AA por decrementos en temp. mín.	%	0.07	7.63	29.79	41.46	100.00	29.74	1.0
	S ⁺ % de AA por incrementos en dur. de sequía	%	0.02	22.97	52.27	87.00	100.00	35.41	0.7
	S ⁻ % de AA por decrementos en dur. de sequía	%	0.01	2.10	39.98	58.18	99.43	33.07	0.8
	Acc % de AA por cambio climático	%	16.52	77.94	85.94	100.00	100.00	18.14	0.2

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; U – unidades; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; temp. – temperatura; dur. – duración y AA – área afectada de la superficie total de la cuenca hidrológica.

Tabla 8.10 Resumen de estadísticas para la Región 4 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidade s	Estadísticos para $N = 66$							
			Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V.	
Región 4: cuencas de selva	A	Área	km ²	69	254	2,730	3,003	38,359	5,687	2.08
	P	Perímetro	km	57	118	360	480	2,235	375	1.04
	E _m C	Elevación media	msnm	182	741	1,157	1,580	2,190	544	0.47
	M _m C ^o	Pendiente media de la cuenca	°	3.36	10.71	13.09	15.35	21.72	4.02	0.31
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	5.88	19.68	24.27	28.78	41.53	7.81	0.32
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.64	1.96	2.40	2.71	3.53	0.45	0.19
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.08	0.14	0.19	0.26	0.37	0.07	0.37
	RH	Relación hipsométrica	-	1.00	1.21	1.79	2.36	6.31	1.13	0.63
	T _c K	Tc Kirpich	h	0.03	3.88	12.80	17.63	73.38	14.13	1.10
	T _c C	Tc CHPBW	h	0.03	3.90	12.87	17.72	73.77	14.21	1.10
	L _c	Longitud del río principal	km	0.74	41.65	109.48	151.73	520.10	108.43	0.99
	L _a	Longitud directa del río principal	km	13.16	28.18	59.73	81.25	181.38	45.47	0.76
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.02	1.38	1.65	1.95	2.95	0.56	0.34
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	365	1,757	2,062	2,344	3,252	572	0.28
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	2	30	313	481	1,480	360	1.15
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	2.76	4.38	6.86	8.45	13.71	2.90	0.42
	P _m	Precipitación media anual	mm	1,199	1,903	2,576	2,987	6,313	929	0.36
	T _m	Temperatura media anual	°C	14.6	19.1	21.1	23.3	26.1	2.9	0.14
	D _a A	D _a anfibios	-	4	7	11	16	19	5	0.41
	D _a M	D _a mamíferos	-	103	114	124	133	139	10	0.08
	D _a R	D _a reptiles	-	11	15	21	26	40	7	0.33

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q₁ – percentil 25 de los datos; Q₃ – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.10 (Cont.) estadísticas para la Región 4 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidad	Estadísticos para $N = 66$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 4: cuencas de selva	IAH1	I. aportación anual	-	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	ND	ND
	IAH2	I. aportación mensual	-	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	ND	ND
	IAH3	I. variabilidad habitual	-	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	ND	ND
	IAH4	I. variabilidad extrema	-	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	ND	ND
	IAH5	I. máximos estacionalidad	-	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	ND	ND
	IAH6	I. mínimos estacionalidad	-	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	ND	ND
	IAH7	I. avenidas máximas	-	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	ND	ND
	IAH8	I. caudal generador de lecho	-	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	ND	ND
	IAH9	I. caudal de conectividad	-	0.00	ND	ND	ND	0.00	ND	ND
	IAH10	I. avenidas habituales	-	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	ND	ND
	IAH11	I. variabilidad avenidas máx.	-	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	ND	ND
	IAH12	I. variabilidad avenidas hab.	-	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	ND	ND
	IAH13	I. duración de avenidas	-	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	ND	ND
	IAH14	I. avenidas estacionalidad	-	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	ND	ND
	IAH15	I. sequías extremas	-	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	ND	ND
	IAH16	I. sequías habituales	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	ND	ND
	IAH17	I. variabilidad sequía extrema	-	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	ND	ND
	IAH18	I. variabilidad sequía habitual	-	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	ND	ND
	IAH19	I. duración de sequías	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	ND	ND
	IAH20	I. no. de días con $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	-	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	ND	ND
	IAH21	I. sequías estacionalidad	-	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	ND	ND
	IAG1	I. global val. habituales	-	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	ND	ND
	IAG2	I. global extremos máx.	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	ND	ND
	IAG3	I. global extremos mín.	-	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	ND	ND

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; IAH – índice de alteración hidrológica; IAG – índice de alteración hidrológica global y ND – no determinado.

Tabla 8.10 (Cont.) estadísticas para la Región 4 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

Variable			U.	Estadísticos para $N = 66$						
				Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V
Región 4: cuencas de selva	Dn	Disponibilidad natural media per cápita	m ³ /año	1,436	4,142	9,597	13,897	35,705	7,090	0.74
	IDH	Índice de desarrollo humano	-	0.56	0.61	0.65	0.68	0.76	0.05	0.07
	PIB	Producto interno bruto	\$/km ²	17,221	22,365	31,874	40,619	55,915	10,103	0.32
	PEA	Población económica activa	hab	4,256	15,184	23,333	32,228	55,455	12,280	0.53
	Pob	Densidad de población	hab/km ²	14,089	43,913	73,342	96,957	198,877	42,489	0.58
	P ⁺	% de AA por incrementos en prec.	%	0.18	33.40	59.17	88.44	100.00	31.34	0.5
	P ⁻	% de AA por decrementos en prec.	%	0.18	25.58	59.97	86.09	100.00	34.68	0.6
	T _m ⁺	% de AA por incrementos en temp. med.	%	0.10	21.37	40.41	57.35	87.37	25.58	0.6
	T _m ⁻	% de AA por decrementos en temp. med.	%	0.18	3.08	23.71	31.85	100.00	30.41	1.3
	T _x ⁺	% de AA por incrementos en temp. máx.	%	0.18	18.38	48.65	94.60	100.00	36.85	0.8
	T _x ⁻	% de AA por decrementos en temp. máx.	%	0.14	4.71	40.68	72.59	100.00	33.28	0.8
	T _n ⁺	% de AA por incrementos en temp. mín.	%	0.18	26.44	51.19	73.96	100.00	32.12	0.6
	T _n ⁻	% de AA por decrementos en temp. mín.	%	0.18	11.67	37.93	52.27	100.00	30.00	0.8
	S ⁺	% de AA por incrementos en dur. de sequía	%	0.18	36.78	61.11	82.76	100.00	32.31	0.5
	S ⁻	% de AA por decrementos en dur. de sequía	%	0.21	4.78	23.40	31.58	100.00	27.10	1.2
	Acc	% de AA por cambio climático	%	0.18	73.35	81.12	100.00	100.00	25.64	0.3

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; U – unidades; Q₁ – percentil 25 de los datos; Q₃ – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; temp. – temperatura; dur. – duración y AA – área afectada de la superficie total de la cuenca hidrológica.

Tabla 8.11 Resumen de estadísticas para la Región 5 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidades	Estadísticos para $N = 90$							
			Min	Q ₁	\bar{x}	Q ₃	Max	σ	C.V.	
Región 5: cuencas de la costa oeste	A	Área	km ²	7	280	3,185	2,092	115,269	12,292	3.86
	P	Perímetro	km	17	125	305	367	3502	398	1.30
	E _m C	Elevación media	msnm	292	865	1,203	1,492	2,457	449	0.37
	M _m C°	Pendiente media de la cuenca	°	2.57	10.75	12.96	16.07	22.62	4.07	0.31
	M _m C	Pendiente media de la cuenca	%	4.52	19.52	23.86	29.81	43.06	7.86	0.33
	K _c	Coefficiente de compacidad	km/km	1.51	1.92	2.12	2.24	2.91	0.27	0.13
	R _{ci}	Relación de circularidad	km ² / km ²	0.12	0.20	0.23	0.27	0.44	0.06	0.24
	RH	Relación hipsométrica	-	0.57	1.13	1.81	2.36	4.52	0.80	0.44
	T _c K	Tc Kirpich	h	0.02	3.56	11.59	12.22	133.14	15.87	1.37
	T _c C	Tc CHPBW	h	0.02	3.58	11.66	12.29	133.86	15.95	1.37
	L _c	Longitud del río principal	km	0.34	34.66	97.49	118.49	973.46	117.71	1.21
	L _a	Longitud directa del río principal	km	4.75	27.55	55.34	62.85	417.17	51.35	0.93
	S _h	Coefficiente de sinuosidad	km	0.02	1.41	1.58	1.73	3.83	0.49	0.31
	E _{max}	Elevación máx del río principal	msnm	652	1,507	1,884	2,216	3,407	601	0.32
	E _{min}	Elevación mín del río principal	msnm	8	52	390	586	1,314	353	0.91
	M _m R	Pendiente media del río principal	%	0.35	3.81	5.70	6.07	27.83	4.01	0.70
	P _m	Precipitación media anual	mm	481	912	1,166	1,351	2,413	350	0.30
	T _m	Temperatura media anual	°C	14.5	20.4	21.9	23.7	26.7	2.7	0.12
	D _α A	D _α anfibios	-	6	10	13	16	19	3	0.25
	D _α M	D _α mamíferos	-	71	92	97	105	117	9	0.09
	D _α R	D _α reptiles	-	15	24	26	30	43	5	0.19

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q₁ – percentil 25 de los datos; Q₃ – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; Tc – tiempo de concentración y msnm – metros sobre nivel del mar.

Tabla 8.11 (Cont.) estadísticas para la Región 5 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	Unidad	Estadísticos para $N = 90$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V.	
Región 5: cuencas de la costa oeste	IAH1	I. aportación anual	-	0.07	0.12	0.39	0.67	0.84	0.30	0.76
	IAH2	I. aportación mensual	-	0.04	0.12	0.36	0.55	0.74	0.24	0.68
	IAH3	I. variabilidad habitual	-	0.15	0.33	0.51	0.70	0.97	0.26	0.52
	IAH4	I. variabilidad extrema	-	0.10	0.12	0.44	0.69	0.93	0.31	0.70
	IAH5	I. máximos estacionalidad	-	0.67	0.83	0.90	1.00	1.00	0.14	0.16
	IAH6	I. mínimos estacionalidad	-	0.33	0.58	0.75	0.96	1.00	0.27	0.37
	IAH7	I. avenidas máximas	-	0.05	0.15	0.41	0.57	0.94	0.27	0.65
	IAH8	I. caudal generador de lecho	-	0.24	0.55	0.63	0.72	0.93	0.21	0.34
	IAH9	I. caudal de conectividad	-	0.01	0.11	0.24	0.31	0.69	0.24	1.01
	IAH10	I. avenidas habituales	-	0.12	0.21	0.45	0.57	0.93	0.27	0.60
	IAH11	I. variabilidad avenidas máx.	-	0.14	0.53	0.57	0.73	0.95	0.26	0.45
	IAH12	I. variabilidad avenidas hab.	-	0.20	0.42	0.56	0.74	0.87	0.22	0.38
	IAH13	I. duración de avenidas	-	0.25	0.42	0.60	0.78	0.87	0.20	0.33
	IAH14	I. avenidas estacionalidad	-	0.08	0.33	0.50	0.68	0.85	0.25	0.50
	IAH15	I. sequías extremas	-	0.02	0.08	0.33	0.31	1.00	0.37	1.11
	IAH16	I. sequías habituales	-	0.07	0.14	0.35	0.47	0.89	0.31	0.88
	IAH17	I. variabilidad sequía extrema	-	0.18	0.37	0.51	0.69	0.76	0.22	0.44
	IAH18	I. variabilidad sequía habitual	-	0.10	0.29	0.51	0.70	0.98	0.27	0.53
	IAH19	I. duración de sequías	-	0.04	0.33	0.51	0.61	0.98	0.27	0.53
	IAH20	I. no. de días con $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	-	0.03	0.05	0.36	0.54	1.00	0.39	1.07
	IAH21	I. sequías estacionalidad	-	0.10	0.13	0.23	0.31	0.42	0.11	0.48
	IAG1	I. global val. habituales	-	0.07	0.12	0.39	0.67	0.84	0.30	0.76
	IAG2	I. global extremos máx.	-	0.04	0.12	0.36	0.55	0.74	0.24	0.68
	IAG3	I. global extremos mín.	-	0.15	0.33	0.51	0.70	0.97	0.26	0.52

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; IAH – índice de alteración hidrológica; IAG – índice de alteración hidrológica global.

Tabla 8.11 (Cont.) estadísticas para la Región 5 de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

	Variable	U.	Estadísticos para $N = 90$							
			Min	Q_1	\bar{x}	Q_3	Max	σ	C.V	
Región 5: cuencas de la costa oeste	Dn	Disponibilidad natural media per cápita	m ³ /año	175	1,674	3,967	5,303	19,432	3,620	0.91
	IDH	Índice de desarrollo humano	-	0.23	0.64	0.68	0.73	0.80	0.08	0.11
	PIB	Producto interno bruto	\$/km ²	19,798	32,359	42,614	51,662	88,742	11,251	0.26
	PEA	Población económica activa	hab	795	6,526	17,629	16,440	315,524	34,345	1.95
	Pob	Densidad de población	hab/km ²	2,407	19,282	46,272	47,673	735,281	79,866	1.73
	P ⁺	% de AA por incrementos en prec.	%	0.14	17.97	49.17	81.44	100.00	34.91	0.7
	P ⁻	% de AA por decrementos en prec.	%	1.83	26.11	49.95	71.50	100.00	29.22	0.6
	T _m ⁺	% de AA por incrementos en temp. med.	%	1.75	25.45	58.84	96.55	100.00	34.60	0.6
	T _m ⁻	% de AA por decrementos en temp. med.	%	0.02	1.43	7.69	11.30	61.32	11.76	1.5
	T _x ⁺	% de AA por incrementos en temp. máx.	%	0.62	11.66	27.00	38.83	83.34	21.22	0.8
	T _x ⁻	% de AA por decrementos en temp. máx.	%	4.65	40.42	63.61	90.64	100.00	28.95	0.5
	T _n ⁺	% de AA por incrementos en temp. mín.	%	2.44	33.59	58.90	87.91	100.00	30.33	0.5
	T _n ⁻	% de AA por decrementos en temp. mín.	%	0.60	9.34	24.83	32.07	100.00	24.42	1.0
	S ⁺	% de AA por incrementos en dur. de sequía	%	0.52	15.95	43.80	68.35	100.00	31.28	0.7
	S ⁻	% de AA por decrementos en dur. de sequía	%	0.05	0.86	20.20	43.35	76.31	25.54	1.3
	Acc	% de AA por cambio climático	%	28.43	77.00	86.42	100.00	100.00	19.05	0.2

Donde: N – cantidad total de cuencas hidrológicas; U – unidades; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; \bar{x} – media de los datos; σ – desviación estándar; C.V. – coeficiente de variación; temp. – temperatura; dur. – duración y AA – área afectada de la superficie total de la cuenca hidrológica.

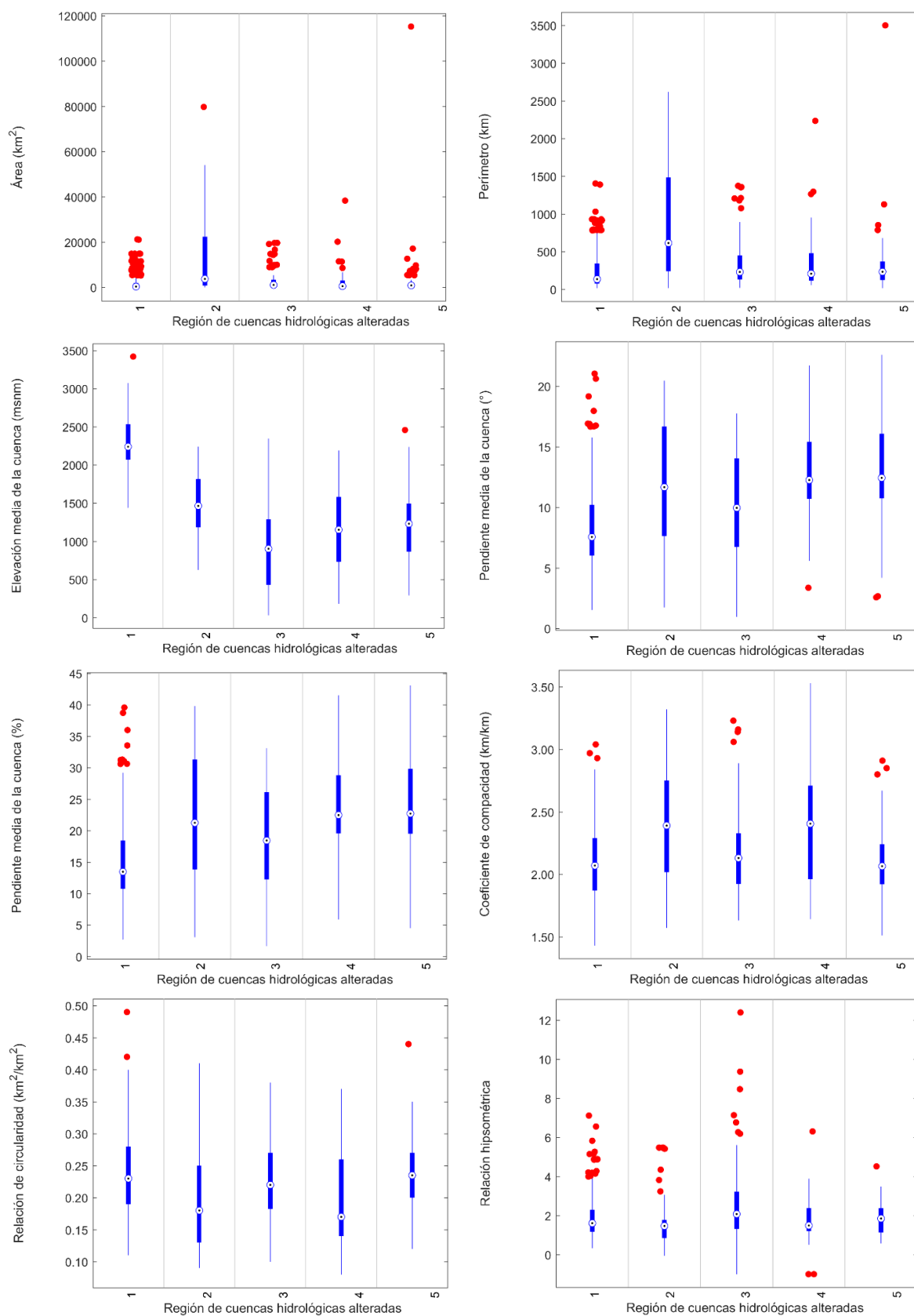


Figura 8.10 Variabilidad de parámetros fisiográficos de las regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

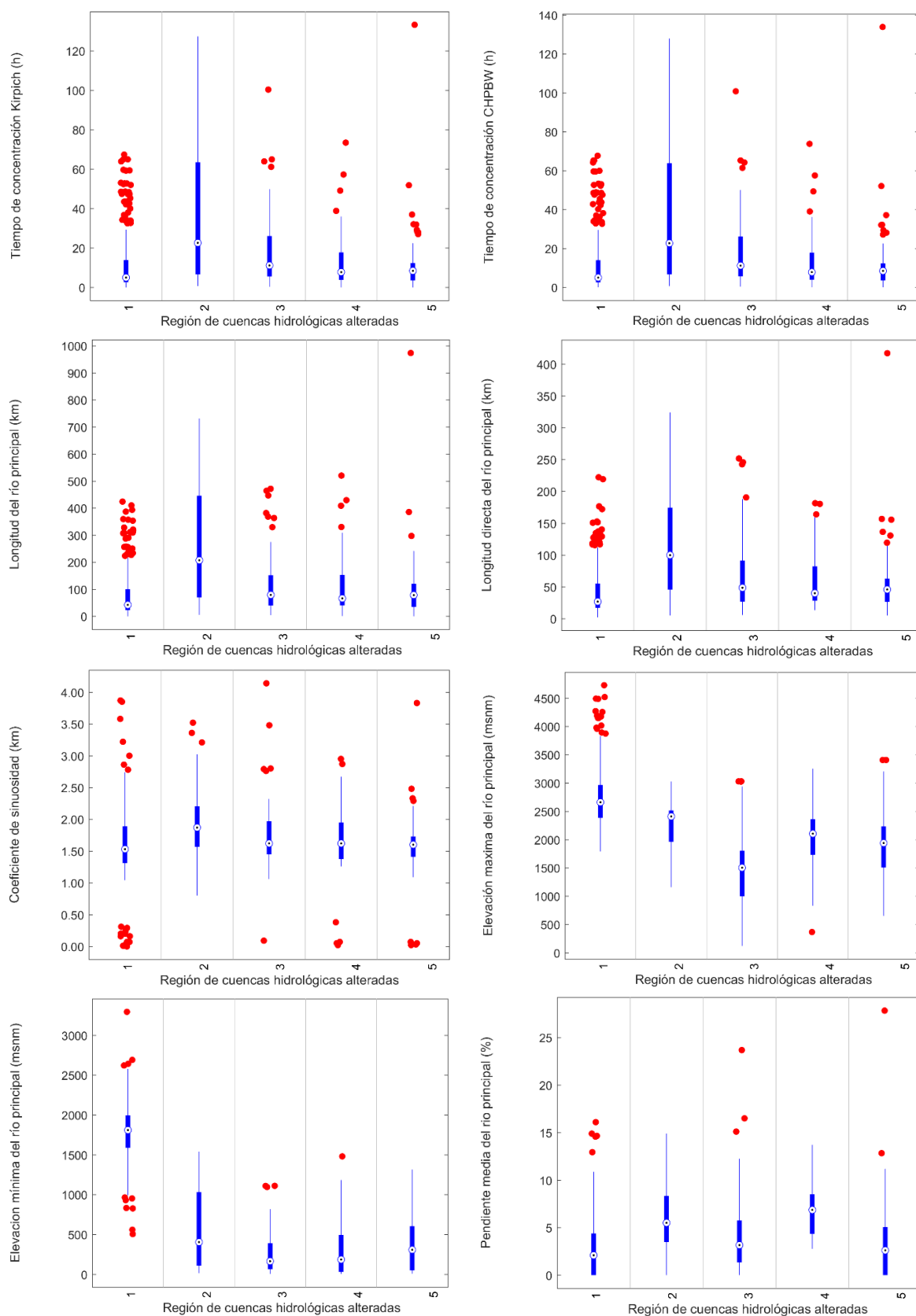


Figura 8.10 (Cont.) Variabilidad de parámetros fisiográficos de las regiones de cuencas alteradas en su régimen hidrológico.

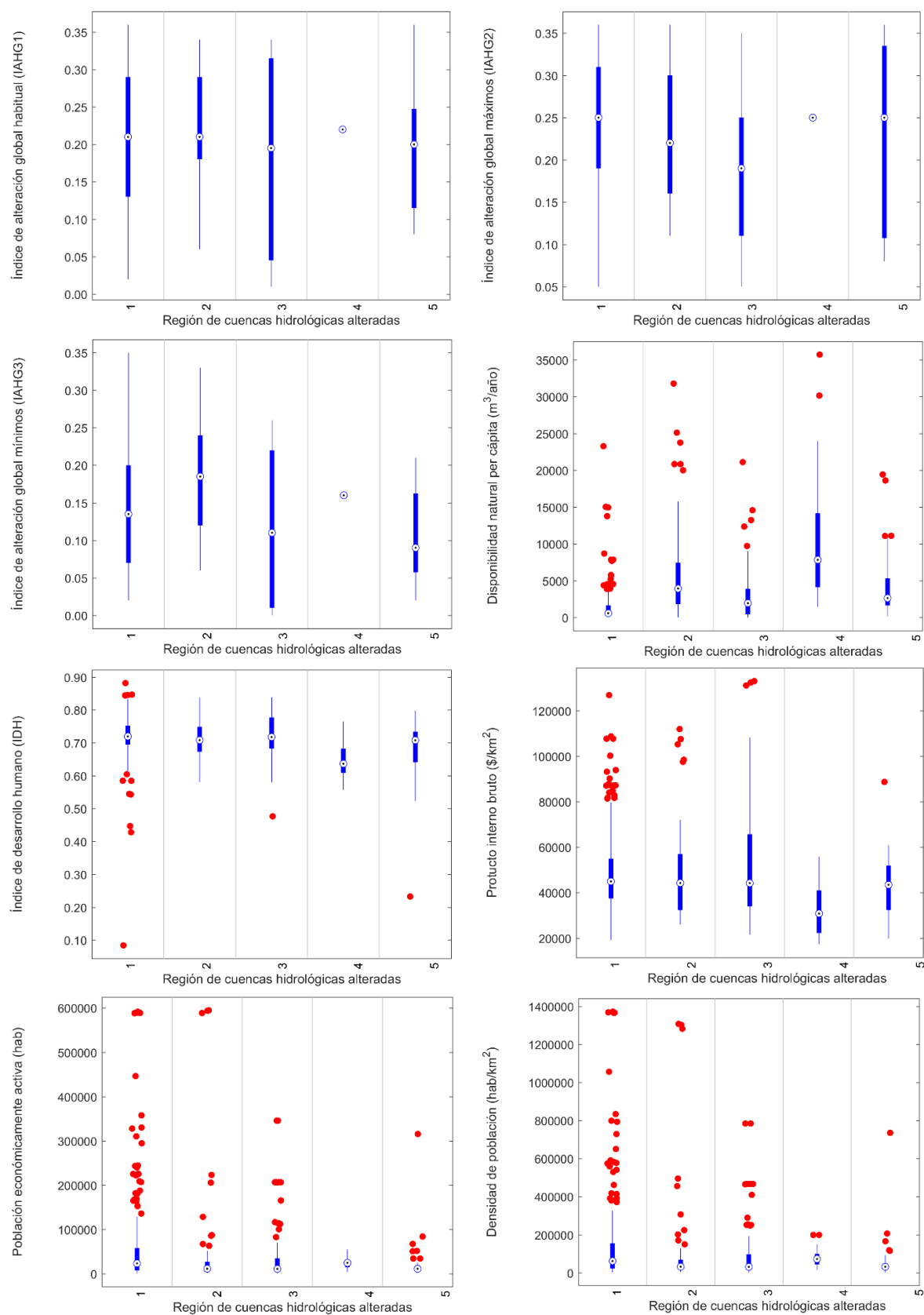


Figura 8.11 Variabilidad de índices de alteración hidrológica global (IAHG) y parámetros socioeconómicos.

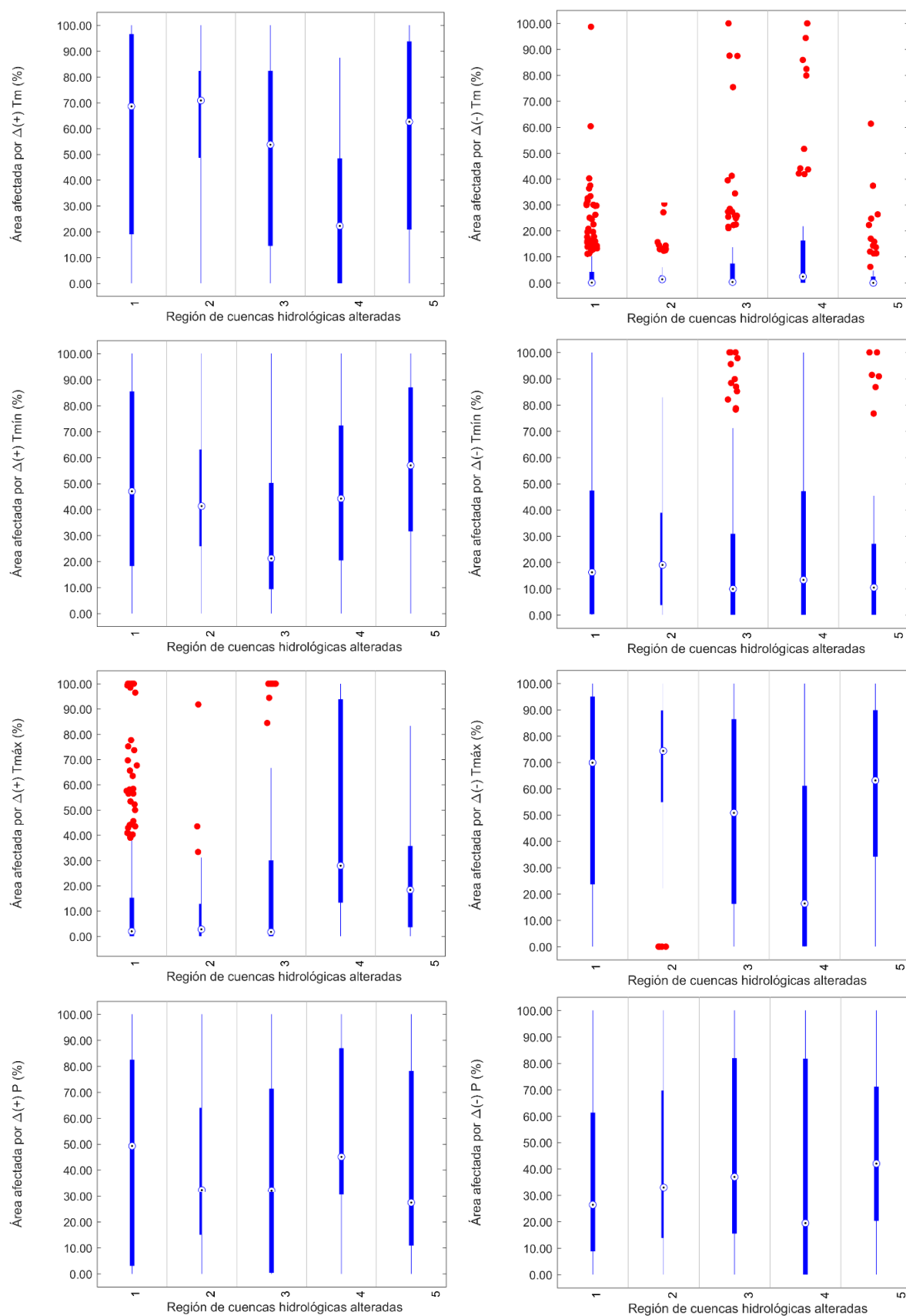


Figura 8.12 Variabilidad de parámetros de cambio climático, clima y biodiversidad alfa.

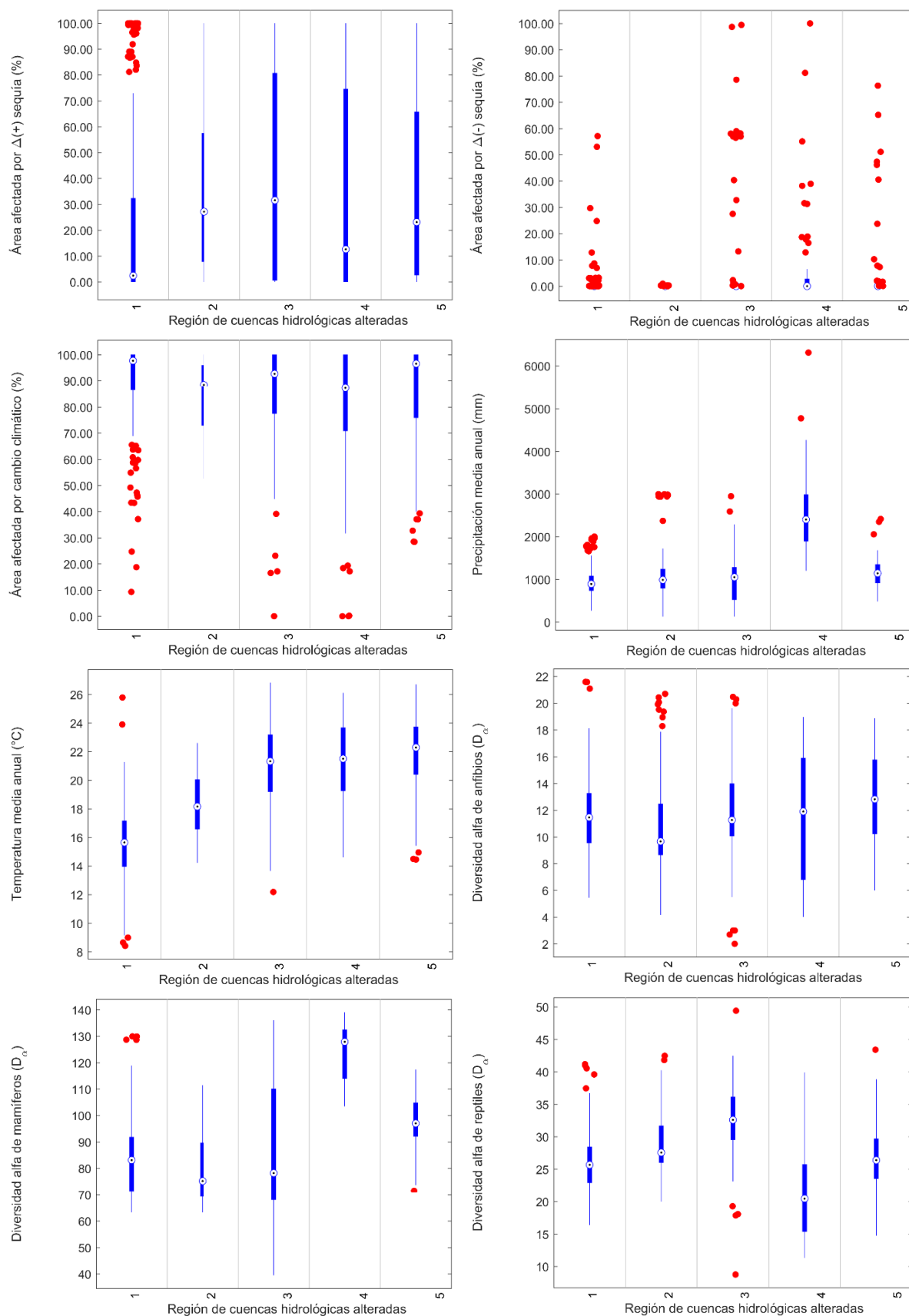


Figura 8.12 (Cont.) Variabilidad de parámetros de cambio climático, clima y biodiversidad alfa.

8.6. Conclusiones

El procedimiento de regionalización permitió identificar las diferencias y similitudes en las cuencas hidrológicas tanto alteradas como no alteradas en su régimen hidrológico. Se observó que la distancia de disimilitud de Chebychev muestra un buen desempeño considerando la variabilidad espacial y el tipo de información empleada. Se recomienda emplearla en estudios futuros de regionalización si las características de la información son similares, en distribución y naturaleza, a la empleada dentro del marco de la investigación.

Las cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico fueron regionalizadas por separado con la finalidad de contar con grupos homogéneos para emplearlos en el método de estimación de caudal en sitios no aforados propuesto por Requena et al. (2017; Capítulo 9). De esta forma, se busca estimar las series de caudales no alterados y alterados en su régimen hidrológico. Los resultados mostraron coherencia con la geografía, topografía y ecología del país. Sin embargo, entre más pase el tiempo, las condiciones no alteradas se alejarán más de la dinámica hidrológica de los ríos, hasta constituir una pequeña parte en las series de caudales registrados en las estaciones de aforo. Por tanto, se recomienda conceptualizar el estado no alterado y alterado como un solo sistema donde coexisten el ser humano y la naturaleza. Es decir, replicar el proceso de regionalización con todas las cuencas como insumo.

En el marco de la presente investigación, se ha mostrado evidencia suficiente de la correlación entre el desarrollo humano y las condiciones de alteración del régimen hidrológico. Adicionalmente, se mencionaron los efectos que las actividades humanas tienen sobre la dinámica global del planeta. Por tal razón, existe un fuerte debate en la comunidad científica para reemplazar o secuenciar la época geológica del Holoceno (época actual) por Antropoceno (Cutzen y Stoermer, 2000).

Por otro lado, es importante señalar que la D_α de los tres grupos de especies contemplados en el estudio, no mostraron ninguna correlación notoria con alguna variable fisiográfica y climática (Tabla 8.6). Por ello, se recomienda emplear la D_α o alguna otra variable ecológica (e.g: NDVI) para procesos de regionalización futuros en México, ya que estas variables podrían ser benéficas para definir notoriamente los grupos de cuencas. Ese fue el caso en la presente investigación.

CAPÍTULO 9

CAUDAL ECOLÓGICO EN MÉXICO

9.1. Introducción

En el campo de la hidrología se requiere, con frecuencia, conocer la magnitud de los caudales a escala diaria o mensual en sitios sin aforo hidrométrico. Esto es necesario para el diseño y manejo apropiado de estructuras hidráulicas, prevención de inundaciones, gestión integrada del recurso hídrico (GIRH), etc. (Requena, Ouarda y Chabana, 2017). El estudio del caudal ecológico no es la excepción: se requieren conocer la series de caudales diarios en sitios no aforados para estimar su magnitud. Por tanto, surge el desafío científico ¿cómo estimar las series de caudales en sitios no aforados a partir de los datos de estaciones hidrométricas circundantes? (Figura 9.1). La respuesta a esta interrogativa se ha abordado desde perspectivas estocásticas como determinísticas. En el presente capítulo se presentan métodos estadísticos de regionalización de análisis de frecuencias y métodos geoestadísticos para la estimación del caudal en sitios no aforados.

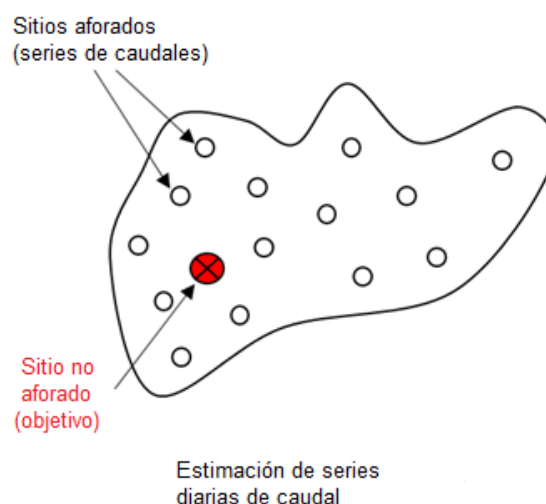


Figura 9.1 Ejemplo de estimación de series de caudales en sitios no aforados. Fuente: adaptada de Requena et al., 2017.

9.2. Métodos para estimar el caudal ecológico en sitios no aforados

Existe una amplia variedad de métodos que facilitan la estimación deseada desde aproximaciones estadísticas hasta métodos determinísticos distribuidos espacialmente (e.g: modelo Cequeau). Por la parte estadística, los métodos son clasificados en cuatro grandes grupos: i) métodos de regresión; ii) métodos basados en indicadores de inundación; iii) métodos geoestadísticos y iv) métodos basados en regionalización del análisis de frecuencias (Ouarda, 2013). En la presente investigación, los métodos geoestadísticos y de regionalización de análisis de frecuencias fueron empleados para la estimación de las series de caudales diarios en sitios no aforados. Los detalles de sus métodos se presentan con detalle en las secciones siguientes.

9.2.1. Métodos geoestadísticos

Los métodos geoestadísticos estiman el caudal a escala diaria o mensual por medio de una agregación de cuencas hidrológicas. Cada cuenca es tratada como un bloque que puede ser discretizado por una serie de puntos, es decir, se emplea el método de Kriging por bloques para caracterizar los puntos de la cuenca (Isaaks y Srivastava, 1989). La configuración de cada bloque se modifica conforme las cuencas se agregan aguas abajo. Finalmente, se estima la magnitud del caudal en función de la covarianza entre los puntos que caracterizan cada cuenca hidrológica y del caudal registrado en cada estación hidrométrica asociada a su cuenca (Skøien, Merz y Blöschl, 2006). Estos métodos han demostrado ser eficaces en sitios con baja alteración hidrológica. Sin embargo, presenta deficiencias cuando existe una reducción de la magnitud del caudal por presencia de presas y/o bordos y demanda un alto consumo de tiempo para la generación de las series debido a la agregación de las cuencas hidrológicas aguas abajo.

La discretización de puntos dentro de la cuenca hidrológica es una etapa importante en este grupo de métodos. Por tanto, se introduce el método de Kriging por bloques (KxB) para mostrar el procedimiento básico de discretización. Posteriormente, se describe el método geoestadístico Top Kriging (TK, Skøien et al., 2006), el cual guarda una estrecha relación con el método KxB. Sus principales diferencias son: i) TK emplea el área de la cuenca como medida de soporte y ii) TK asigna los pesos ponderados en función de la agregación de cuencas aguas abajo.

Kriging por bloques

En ocasiones, se busca estimar el valor medio dentro de alguna región dada (e.g: una cuenca hidrológica, una entidad federativa, un municipio, una región de protección, etc.). Una solución a este problema es a través de la discretización del área deseada en varios puntos y estimar el valor de la variable en dichos puntos (Figura 9.2). Se promedian las estimaciones para asignar un valor único al bloque en estudio. Sin embargo, lo anterior resulta computacionalmente lento ya que debe resolverse un sistema de kriging por cada punto a estimar.

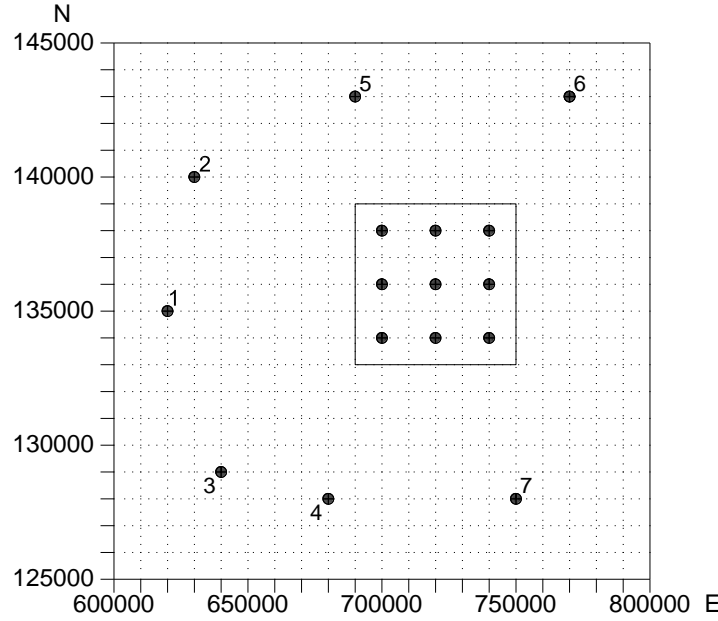


Figura 9.2 Representación gráfica de kriging por bloques.

El sistema de kriging por bloques se parece al sistema de kriging ordinario (Ec. 5-24). Donde \tilde{C}_{nn} representa la covarianza de las variables aleatorias V_i en los puntos observados x_i . El vector D está formado por las covarianzas entre las variables aleatorias V_i y las variables aleatorias cuya magnitud deseamos conocer (V_0). El vector w está formado por los pesos ponderados de las n variables y la varianza de su sistema (μ). Se puede demostrar que el valor medio de una función aleatoria sobre un área determinada es simplemente el promedio de las combinaciones lineales de todos los puntos contenidos en dicha área (Isaaks y Srivastava, 1989):

$$V_A = \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} V_j \quad \text{Ec. 9-1}$$

Donde: V_A es una variable aleatoria correspondiente a la media de todos los puntos localizados en el área A ; V_j son las variables aleatorias de los puntos contenidos en el área A .

Del sistema de kriging (Ec. 5-24) se observa que la ubicación del punto o bloque objetivo (x_0) no se requiere para construir la matriz de covarianzas C . Se concluye que la matriz C no cambia dentro del sistema y la estimación de kriging por bloques se reduce a estimar las covarianzas del vector D . En el caso de kriging por bloques, las covarianzas del vector D se denotan como \tilde{C}_{iA} , es decir, la covarianza entre la variable aleatoria V_i y el bloque de área A . Dichas covarianzas se obtienen como sigue:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{iA} &= \text{Cov}\{V_A V_i\} \\ &= E\{V_A V_i\} - E\{V_A\}E\{V_i\} \quad \text{sustituyendo la Ec. 9-1} \end{aligned} \quad \text{Ec. 9-2}$$

$$\begin{aligned}
&= E \left\{ \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} V_j V_i \right\} - E \left\{ \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} V_j \right\} E \{V_i\} \\
&= \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} E \{V_j V_i\} - \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} E \{V_j\} E \{V_i\} \\
&= \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} [E \{V_j V_i\} - E \{V_j\} E \{V_i\}] \\
&= \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} Cov \{V_j V_i\}
\end{aligned}$$

Le ecuación Ec. 9-2 demuestra que la covarianza entre la i -ésima variable aleatoria observada V_i y la variable aleatoria V_A que representa el valor medio del fenómeno estudiado acotado por el área A , es igual al promedio de las covarianzas entre las variables aleatorias puntuales V_i y las variables de todos los puntos contenidos en el área (V_j). Por ello, la covarianza de puntos a bloque queda dada como:

$$\tilde{C}_{iA} = \frac{1}{|A|} \sum_{j|j \in A} \tilde{C}_{ij} \quad \text{Ec. 9-3}$$

Donde: \tilde{C}_{iA} es la covarianza de la variable observada en el punto i con el bloque de área A ; \tilde{C}_{ij} es la covarianza entre la variable aleatoria observada en el punto i y la variable aleatoria en el punto j con $j \in A$.

Con varianza:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \frac{1}{|A|^2} \sum_{i|i \in A} \sum_{j|j \in A} \tilde{C}_{ij} - \left(\sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{iA} + \mathcal{L} \right) \quad \text{Ec. 9-4}$$

Donde: $\tilde{\sigma}_R^2$ es la varianza de kriging; \tilde{C}_{ij} es la covarianza entre la variable aleatoria observada en el punto i y la variable aleatoria en el punto j ; w_i es el peso ponderado para cada valor observado; \tilde{C}_{iA} es la covarianza de la variable observada en el punto i con el bloque de área A y \mathcal{L} es el parámetro de Lagrange que produce la condición de no sesgo.

Cabe mencionar que este sistema depende estrictamente de la cantidad de puntos para discretizar el bloque en cuestión. Sin embargo, tiene la ventaja de reducir el tiempo de estimación notablemente.

Top kriging

El método de top kriging es el caso general de la interpolación por bloques (Skøien et al., 2006). En este método, se considera a la cuenca hidrológica como un bloque discretizado por varios puntos distribuidos homogéneamente dentro de su área. La configuración de cada bloque cambia en función del curso del río aguas abajo, es decir, cada punto sobre el río genera una cuenca hidrológica (Figura 9.3).

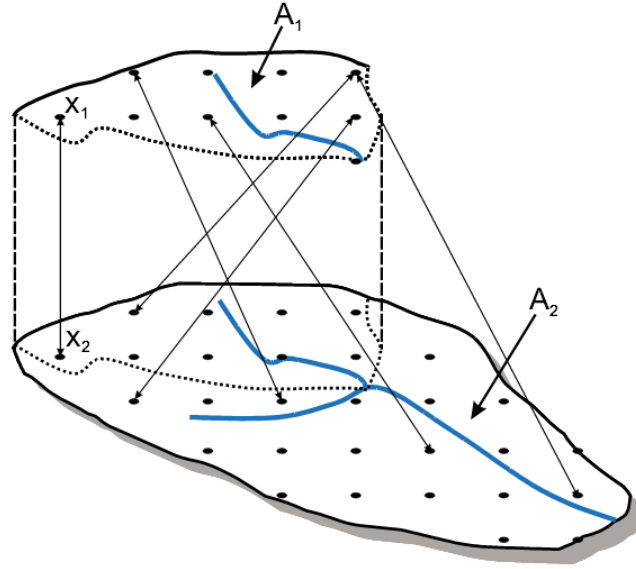


Figura 9.3 Agregación de bloques por top-kriging. Fuente: Skøien et al. (2006).

Este método se basa en la covarianza entre los puntos que discretizan cada una de las cuencas. Por comodidad, se representa en función del variograma:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{ij} &= \frac{1}{2} \times \text{Var} \left(V(A_i) - V(A_j) \right) \\
 &= \frac{1}{A_i A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \gamma_p(|x_i - x_j|) dx_i dx_j \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{A_i^2} \int_{A_i} \int_{A_i} \gamma_p(|x_i - x_j|) dx_i dx_j \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{A_j^2} \int_{A_j} \int_{A_j} \gamma_p(|x_i - x_j|) dx_i dx_j \right]
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 9-5}$$

Donde: γ_{ij} es el variograma entre los puntos discretos x_i, x_j dentro de dos cuencas de áreas A_i y A_j .

El valor medio dentro de la cuenca se obtiene de forma similar al obtenido por bloques:

$$\hat{V}(A) = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n w_i \cdot V_i
 \tag{Ec. 9-6}$$

Donde: $\hat{V}(A)$ es el valor medio estimado de la cuenca con área A ; w_i son los pesos ponderados del punto discreto x_i y V_i es el valor observado dentro de la cuenca de área A .

Otra característica sobresaliente de este método es que los pesos ponderados de cada cuenca son asignados con base en la agregación de cuencas aguas abajo. Por ejemplo, si se cuenta con dos cuencas de un tamaño similar separadas a una misma distancia de una subcuenca, los pesos ponderados respetan la continuidad del río incluso si la distancia entre cuencas observadas es la misma. Por ende, una subcuenca que se encuentre dentro de la red de drenaje de una cuenca aforada tendrá mayor importancia que una cuenca vecina perteneciente a otro afluente.

La Figura 9.4 muestra la asignación de pesos ponderados en tres casos de bloques o cuencas: a) cuando los bloques no se encuentran conectados por un río; b) agregación aguas abajo de dos bloques separados a la misma distancia (10 km) en dos ríos diferentes y c) agregación aguas arriba de dos bloques separados a la misma distancia (10 km) en dos ríos diferentes.

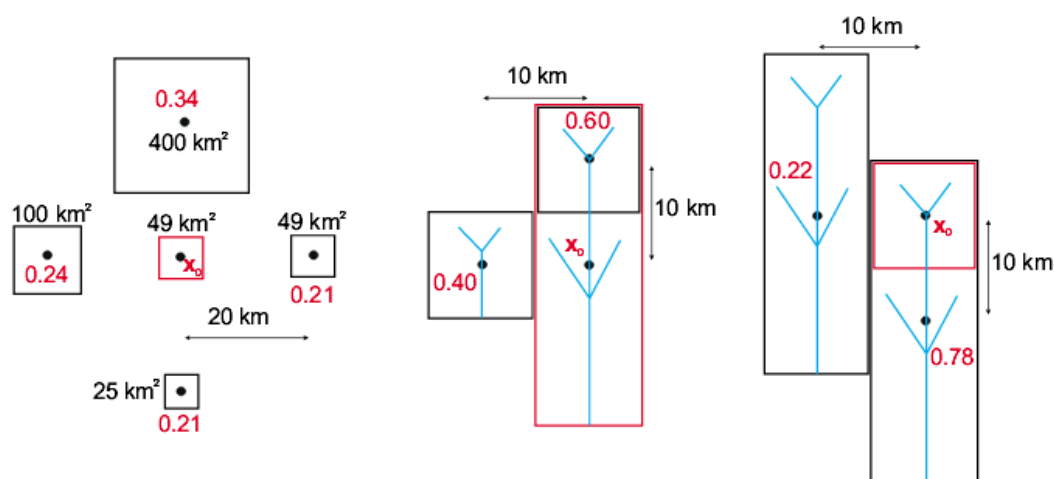


Figura 9.4 Comparación de pesos en top kriging. Fuente: Skøien et al. (2006).

9.2.2. Métodos de clasificación regional

A diferencia de otros modelos hidrológicos, los métodos estadísticos de regionalización han sido empleados por su fácil aplicación y el bajo costo computacional requerido para su análisis (Zegelew y Alfredsen, 2014; Requena et al., 2016). Dentro de los métodos más populares se encuentran el método de la tasa escurrimiento-área (DAR, por sus siglas en inglés; Stedinger et al., 1993) y los métodos basados en curvas de duración de caudales (CDC; Mohamoud, 2008; Shu y Ouarda, 2012).

El método DAR asume que el sitio no aforado y su donador hidrológico comparten la misma serie de caudales diarios escalados por la tasa de sus áreas. Se ha realizado investigación para mejorar la eficacia de este método (Farmer et al., 2015). Por su parte, los métodos CDC están basados en la relación entre los caudales diarios y su porcentaje de excedencia. La CDC provee un resumen de la variabilidad del caudal en un sitio dado y en combinación con un método apropiado de transferencia de caudal puede ser empleado para estimar las series de caudales

diarios en un sitio sin aforo (Ssegane et al., 2013). Ambos métodos han reportado resultados aceptables en los sitios donde han sido aplicados (Zhang et al., 2014, 2015; Ergen y Kentel, 2016).

Ouarda (2016) propuso un método que consiste en estimar regionalmente las series de caudal diario en sitios no aforados para, posteriormente, estimar cualquier cuantil a través de un análisis de frecuencias. La estimación regional de las series de caudal diario se obtienen con la información de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la misma región. La información hidrológica no es agregada *a priori* como en el caso de los métodos geoestadísticos. Esto impide la pérdida de información hidrológica regional y, al mismo tiempo, provee de una mayor cantidad de información en el sitio no aforado (Requena et al., 2017; Figura 9.5).

Este método se resume de la siguiente forma:

1. Obtener las CDC para cada una de las N estaciones (CDC observadas) en la región donde se obtendrán las series de caudales diarios.
2. Para cada una de las CDC observadas se obtienen los percentiles que la caracterizan. Requena et al. (2017) recomiendan los siguientes percentiles: 0.01, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99. De esta forma se constituyen vectores de $[NX1]$ para cada percentil.
3. Estructurar matrices de P descriptores, fisiográficos y climáticos, de las cuencas correspondientes a las N estaciones hidrométricas. El resultado será una matriz de $[NXP]$.
4. Seleccionar los descriptores que mejor describan cada uno de los percentiles definidos en el punto 2. Dicha selección se realiza a través de una regresión *stepwise* y el resultado será un grupo de descriptores no correlacionados (V_1, V_2, \dots, V_n).
5. Realizar una regresión logarítmica, para cada una de las N estaciones hidrométricas, de la forma:

$$\ln(Q_{p,j}) = \ln(b_0) + b_1 \ln(V_1) + b_2 \ln(V_2) + \dots + b_n \ln(V_n) \quad \text{Ec. 9-7}$$

Donde: $Q_{p,j}$ es el p-ésimo percentil regionalizado de la estación j ; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ son los coeficientes de la regresión logarítmica y V_1, V_2, \dots, V_n son los descriptores no correlacionados obtenidos por la regresión *stepwise*.

6. Estimar una CDC con los percentiles regionalizados ($Q_{p,j}$) a través de una regresión de la forma:

$$CDC_j = \frac{ap + b}{p^c + d} \quad \text{Ec. 9-8}$$

Donde: CDC_j es la CDC por regresión de la estación j ; a, b, c, d son los coeficientes de la regresión y p es la serie de percentiles regionalizados $Q_{p,j}$.

7. Construir series de caudal diario por cada estación hidrométrica ($Q^{d,j}$) a partir de las series de las CDC_j .
8. Ponderar la aportación de cada estación de la región según:

$$w_j = \frac{\frac{1}{d_j}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{d_j}} \quad \text{Ec. 9-9}$$

Donde: CDC_j es la CDC por regresión de la estación j ; a, b, c, d son los coeficientes de la regresión y p es la serie de percentiles regionalizados $Q_{p,j}$.

9. Estimar el caudal diario no aforado como:

$$Q^d = \frac{\sum_{j=1}^N w_j Q^{d,j}}{\sum_{j=1}^N w_j} \quad \text{Ec. 9-10}$$

Donde: Q^d es el caudal diario en el sitio no aforado; w_j es el peso ponderado de la estación j y $Q^{d,j}$ es el caudal diario de la estación j reconstruido a través de la CDC_j .

Estimación regional de series de caudales diarios a un sitio destino

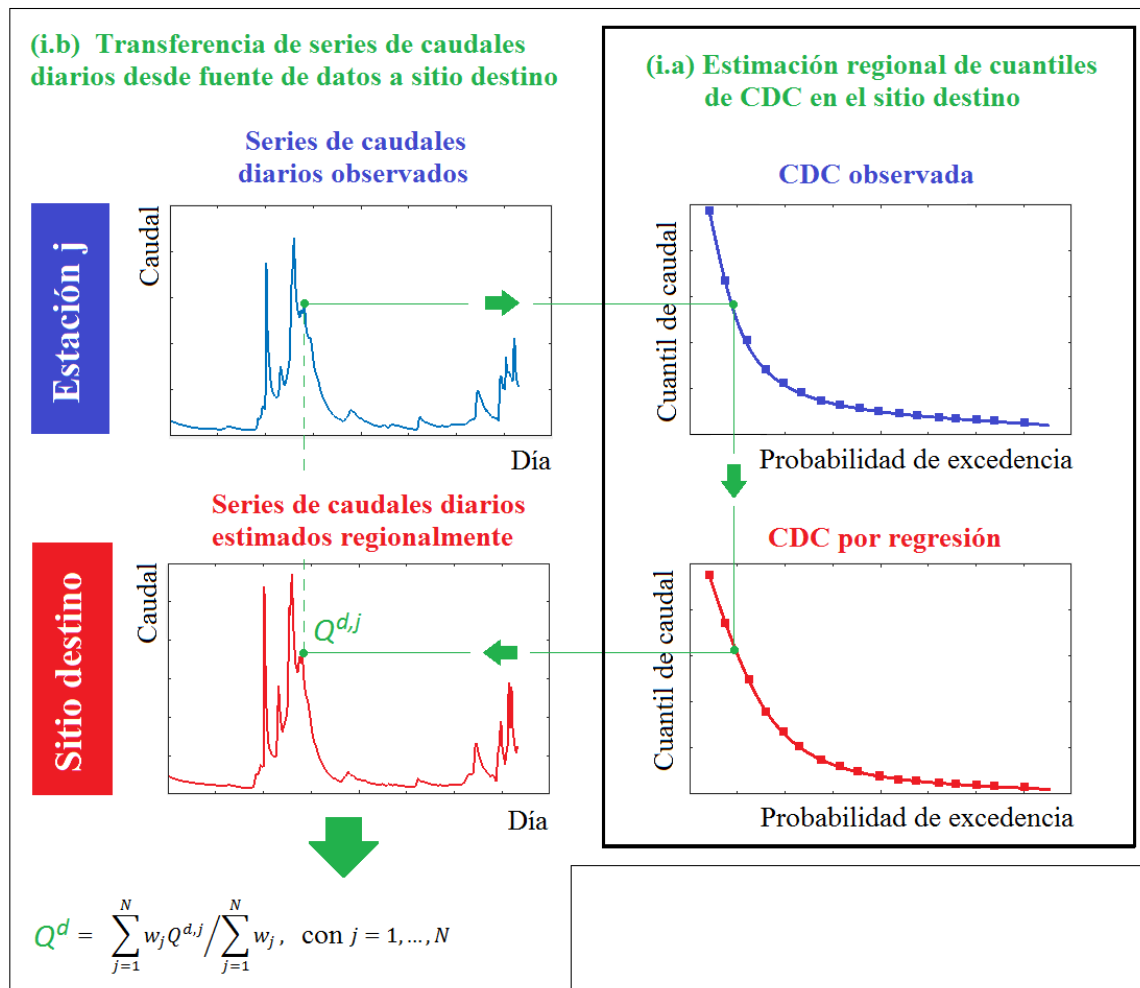


Figura 9.5 Resumen esquemático del método de clasificación regional. Fuente: adaptada de Requena et al. (2017).

9.3. Estimación de caudal ecológico en México

En la sección anterior se presentó dos perspectivas diferentes de como estimar el caudal en un sitio no aforado. Sin bien cada método tiene sus propias ventajas y desventajas, son los principios científicos que permiten diferenciarlos, discutirlos y aceptarlos según las necesidades de cada estudio. Se mencionó que la base principal de los métodos geoestadísticos es la agregación sistemática de las cuencas hidrológicas conforme los tributarios confluyen con el río principal. Es decir, el caudal en la parte baja depende del proceso de escurrimiento de los efluentes aguas arriba. Por otro lado, la clasificación regional retoma los principios físicos que permiten explicar al caudal observado. Estos métodos consideran que las condiciones físicas de las cuencas hidrológicas son, en efecto, los principales descriptores del caudal que escurre desde las partes altas de las montañas. Así mismo, se basa en el principio que existen características similares dentro de un cierto número de cuencas.

Ambos principios son adecuados desde el punto de vista hidrológico. Sin embargo, el segundo tipo de métodos brinda la facilidad de estimar los caudales de forma precisa a escala diaria. Por tanto, se retoma el método propuesto por Requena et al. (2017) para la estimación de caudales diarios en los cauces mexicanos.

9.3.1. Materiales

Con la finalidad de aplicar correctamente el método adoptado para estimar el caudal diario, se requiere consolidar un modelo de escurrimiento confiable a la resolución de 250 m. El procedimiento de trazado y/o modificación del patrón de escurrimiento se realizó en la herramienta hidro-informática HydroDem (Leblois, 2012) ya que contiene herramientas útiles para la realización de tal labor. Algunas de estas herramientas fueron codificadas, como réplica, en la herramienta hidro-informática Hydra-Eflow. Para validar el mapa de drenaje de cuencas, se empleó la base de datos de la red hídrica nacional disponible en el INEGI (INEGI, 2016). Esta red hídrica esta formulada a partir de ortofotos e imágenes SPOT con una resolución de 1.5 m a 3 m y está a disposición por región hidrológica y/o subcuenca.

Por otro lado, la información hidrológica se retoma del proceso de análisis realizado en al Capítulo 4 de la presente investigación. Cabe señalar que las series cronológicas de caudales se dividen en dos partes: i) series cronológicas de caudales no alterados en su régimen hidrológico y ii) series cronológicas de caudales alterados en su régimen hidrológico. Por ello, el método adoptado se empleó para estimar ambas series de caudales. Los grupos de cuencas hidrológicas obtenidos en el Capítulo 8, tanto para condiciones alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico, son empleados para la estimación de curvas de duración de caudal (CDC) regionales. De esta forma, se estima el caudal en su parte no alterada y se aplican los procedimientos indicados en la normatividad mexicana vigente para obtener su caudal ecológico. El resultado final se compara con las series de caudales escurridos en la parte alterada en su régimen hidrológico. La Tabla 9.1 muestra los descriptores físicos empleados.

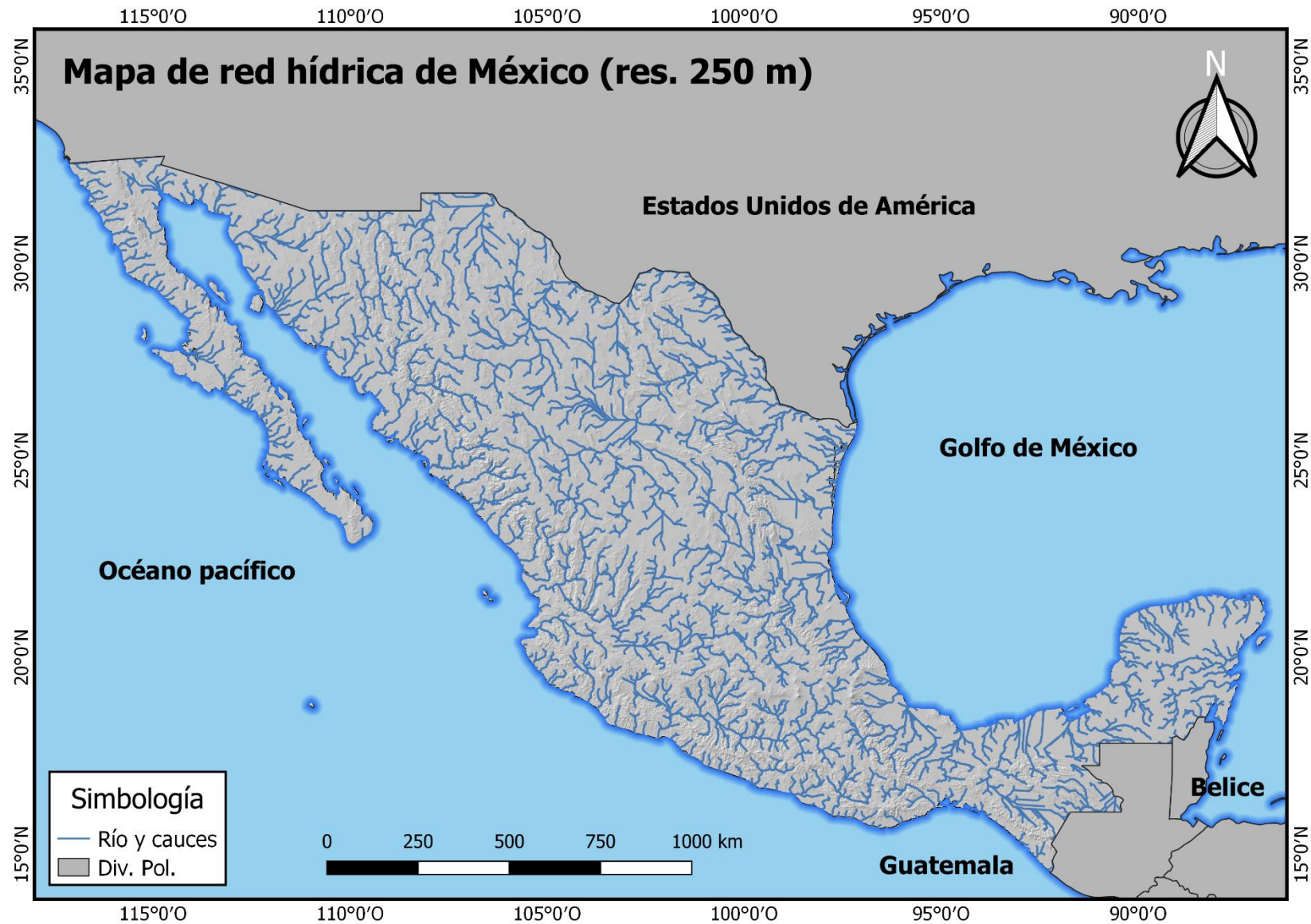


Figura 9.6 Red hídrica de México corregida en HydroDem e Hydra-Eflow a resolución de 250 m.

Tabla 9.1 Descriptores físicos empleados para las CDC regionales.

Región de cuencas hidrológicas	Tabla de descriptores
Regionalización de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico	
Región 1: cuencas medianas y grandes en ambas costas de México	Tabla 8.2
Región 2: cuencas pequeñas en ambas costas de México	Tabla 8.3
Región 3: cuencas del altiplano – norte de México	Tabla 8.4
Región 4: cuencas del centro de México	Tabla 8.5
Regionalización de cuencas alteradas en su régimen hidrológico	
Región 1: cuencas del centro de México	Tabla 8.7
Región 2: cuencas del altiplano – norte de México	Tabla 8.8
Región 3: cuencas de la costa este	Tabla 8.9
Región 4: cuencas de la selva de México	Tabla 8.10
Región 5: cuencas de la costa oeste de México	Tabla 8.11

9.3.2. Resultados

Con las series cronológicas de caudales alterados y no alterados en su régimen hidrológico se formularon sus respectivas CDC observadas. En total se estimaron 199 CDC para las regiones de cuencas no alteradas y 634 CDC para las regiones de cuencas alteradas. Se estimaron los siguientes percentiles para las 833 CDC para ser empleados como respuesta en la clasificación regional: 0.01, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 y 99.9.

Los descriptores físicos significativos para cada grupo de cuencas fueron seleccionados por medio de una regresión *stepwise*. Los resultados revelan que, para el caso de las cuencas no alteradas en su régimen hidrológico, los principales descriptores del caudal son: área de la cuenca hidrológica (A), pendiente media de la cuenca hidrológica (M_mC), elevación media de la cuenca (E_mC) y precipitación media anual (P_m). Cabe señalar que el caudal excedido en el 0.1% es descrito solamente por su A y P_m (Tabla 9.2). Por otro lado, los descriptores físicos del caudal en las cuencas alteradas en su régimen hidrológico son: A , M_mC , E_mC , P_m y PIB. El PIB no es considerado un descriptor físico natural que esté correlacionado con la física de las cuencas hidrológicas. Sin embargo, mostró tener impacto en los caudales medios ($Q_{40\%}$ a $Q_{80\%}$). Por tanto, la producción industrial propia de una cuenca hidrológica impacta directamente al escurrimiento y gestión de los recursos hídricos.

Con los descriptores físicos seleccionados, se estimaron los cuantiles regionalizados de cada una de las 833 CDC (Ec. 9-7). A través de un proceso de regresión, se ajustó la curva presentada en la Ec. 9-8 a los cuantiles regionalizados. La Figura 9.7 muestra el caso de una CDC para la estación 12209 ‘El tambor’ ubicada en un tributario del río Lerma en el estado de Michoacán. Así mismo, se muestra la CDC regionalizada y la CDC ajustada con los percentiles regionalizados. Se observa poca variación entre las tres curvas, por lo que el resultado de la regionalización es confiable para la estación en cuestión. Cabe señalar que también existen cuencas con un ajuste poco perfecto. Sin embargo, los resultados siguen siendo confiables en este tipo de cuencas. La Tabla 9.3 muestra las estadísticas de los parámetros de ajuste para cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico.

Tabla 9.2 Descriptores de cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico seleccionados durante la regresión *stepwise*.

Cuencas no alteradas en régimen hidrológico			Cuencas alteradas en régimen hidrológico		
Cuantil	Descriptor de cuenca	R ²	Cuantil	Descriptor de cuenca	R ²
Q _{0.01%}	A, P _m	91	Q _{0.01%}	A, P _m	76
Q _{0.1%}	A, P _m	77	Q _{0.1%}	A, P _m	93
Q _{0.5%}	A, M _m C, P _m	80	Q _{0.5%}	A, M _m C, P _m	81
Q _{1%}	A, M _m C, P _m	96	Q _{1%}	A, M _m C, P _m	78
Q _{5%}	A, M _m C, E _m C, P _m	86	Q _{5%}	A, M _m C, E _m C, P _m	76
Q _{10%}	A, M _m C, E _m C, P _m	82	Q _{10%}	A, M _m C, E _m C, P _m	86
Q _{20%}	A, M _m C, E _m C, P _m	85	Q _{20%}	A, M _m C, E _m C, P _m	78
Q _{30%}	A, M _m C, E _m C, P _m	95	Q _{30%}	A, M _m C, E _m C, P _m	93
Q _{40%}	A, M _m C, E _m C, P _m	92	Q _{40%}	A, M _m C, E _m C, P _m , PIB	84
Q _{50%}	A, M _m C, E _m C, P _m	75	Q _{50%}	A, M _m C, E _m C, P _m , PIB	82
Q _{60%}	A, M _m C, E _m C, P _m	85	Q _{60%}	A, M _m C, E _m C, P _m , PIB	91
Q _{70%}	A, M _m C, E _m C, P _m	92	Q _{70%}	A, M _m C, E _m C, P _m , PIB	74
Q _{80%}	A, M _m C, E _m C, P _m	82	Q _{80%}	A, M _m C, E _m C, P _m , PIB	95
Q _{90%}	A, M _m C, E _m C, P _m	78	Q _{90%}	A, M _m C, E _m C, P _m	96
Q _{95%}	A, M _m C, E _m C, P _m	82	Q _{95%}	A, M _m C, E _m C, P _m	91
Q _{99%}	A, M _m C, E _m C, P _m	90	Q _{99%}	A, M _m C, E _m C, P _m	88
Q _{99.9%}	A, M _m C, E _m C, P _m	88	Q _{99.9%}	A, M _m C, E _m C, P _m	92

Donde: A – área de cuenca hidrológica; M_mC – pendiente media de la cuenca; E_mC – elevación media de la cuenca; P_m – precipitación media anual y PIB – producto interno bruto.

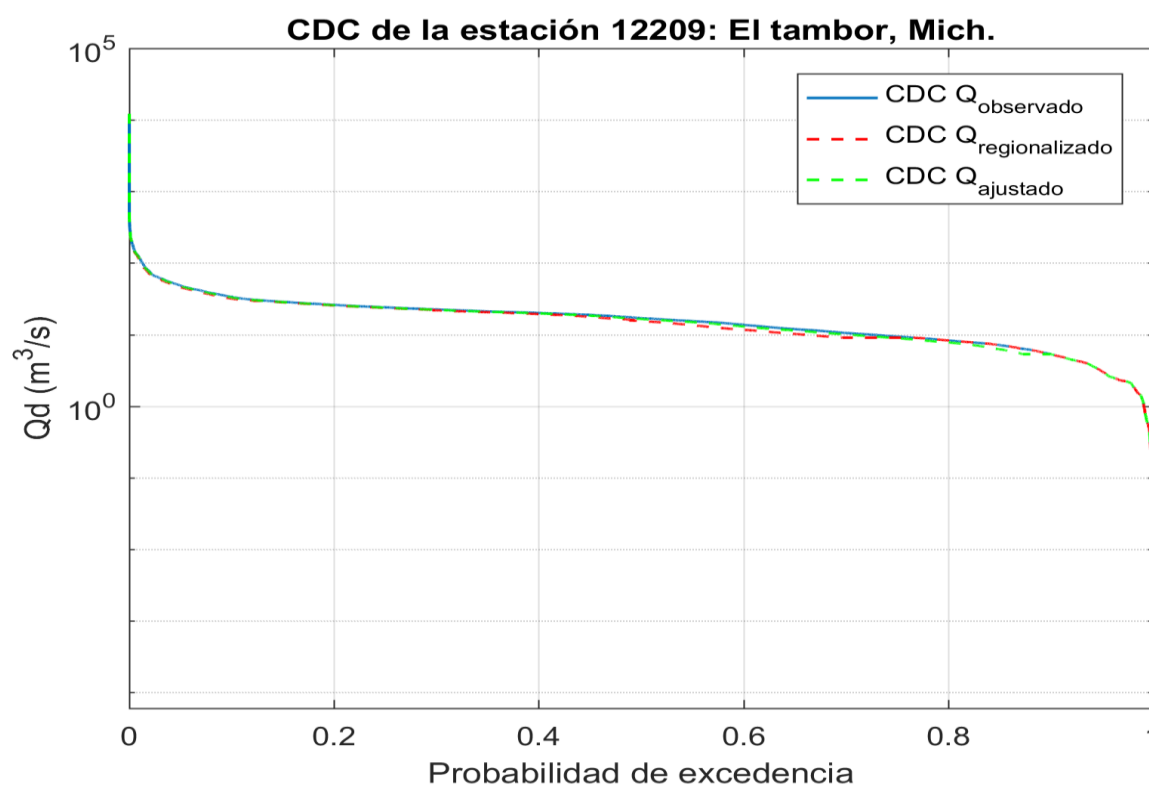
**Figura 9.7** CDC de la estación 12209: El tambor, Michoacán.

Tabla 9.3 Estadísticas de los parámetros de las CDC ajustadas a los percentiles regionalizados.

Cuencas no alteradas en régimen hidrológico					
Parámetro	Mín	\bar{x}	Max	σ	C.V.
a	-1,840.39	-560.32	-70.35	532.15	0.95
b	61.28	483.62	2814.01	503.02	1.04
c	0.24	0.41	0.76	0.11	0.27
d	0.09	0.27	0.69	0.15	0.55
Cuencas alteradas en régimen hidrológico					
a	-1,728.51	-571.62	-81.14	460.15	0.80
b	77.83	567.86	2921.09	617.23	1.09
c	0.36	0.51	0.74	0.08	0.16
d	0.11	0.35	0.73	0.18	0.51

Con las CDC regionalizadas se estimó el caudal diario tanto en su parte natural como en su parte alterada. Este procedimiento se validó mediante validación cruzada (sección 5.2.7) para cada una de las cuencas de cada región hidrológica definida en el Capítulo 8. Así mismo, se estimó el índice de Nash para cada una de éstas (Tabla 9.4). Cabe señalar, que las cuencas del altiplano – norte de México cuenta con los valores más bajos del índice de Nash. Esto puede deberse a que se cuenta con una menor cantidad de datos y una mayor incertidumbre en la estimación.

Tabla 9.4 Índices de Nash promedio para cada región de cuencas hidrológicas.

Región de cuencas hidrológicas	NASH
Regionalización de cuencas no alteradas en su régimen hidrológico	
Región 1: cuencas medianas y grandes en ambas costas de México	0.79
Región 2: cuencas pequeñas en ambas costas de México	0.81
Región 3: cuencas del altiplano – norte de México	0.69
Región 4: cuencas del centro de México	0.83
Regionalización de cuencas alteradas en su régimen hidrológico	
Región 1: cuencas del centro de México	0.85
Región 2: cuencas del altiplano – norte de México	0.73
Región 3: cuencas de la costa este	0.78
Región 4: cuencas de la selva de México	0.83
Región 5: cuencas de la costa oeste de México	0.79

El caudal ecológico se estimó con base en la normatividad mexicana vigente NMX-AA-159-SCFI-2012 donde el coeficiente de caudal se aplicó a la serie de caudales diarios en lugar de la serie de caudales mensuales. La Figura 9.8 muestra el hidrograma de la estación 12209 ‘El tambor’ ubicada en un tributario del río Lerma en el estado de Michoacán.

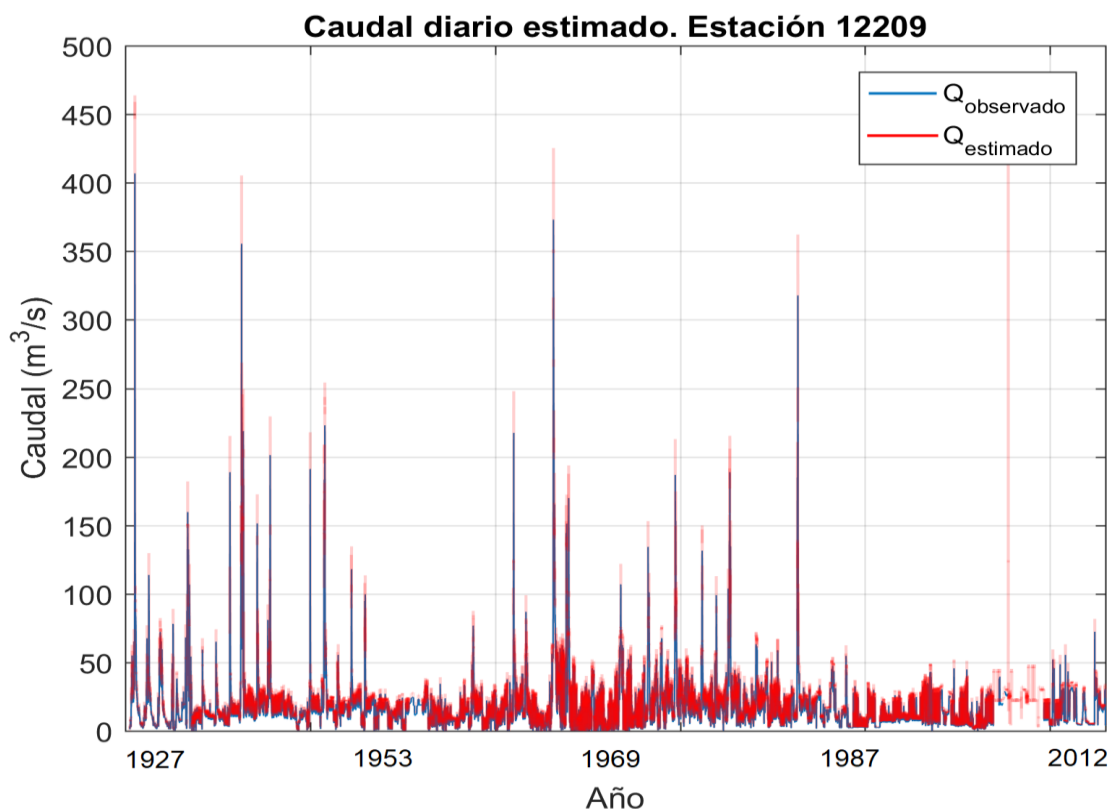


Figura 9.8 Gráfica de caudal diario estimado por clasificación regional para la estación 12209 'El tambor' ubicada en un tributario del río Lerma en el estado de Michoacán.

9.4. Conclusiones

La estimación de caudales en sitios no aforados es uno de los muchos retos que enfrenta la comunidad científica en el campo de la hidrológica. El desarrollo de métodos y su aplicación en diversos lugares, permite identificar sus límites científicos, tecnológicos, físicos y epistemológicos. En México, la aplicación del método de clasificación regional regionalizada presentó una buena eficiencia en la estimación de caudales diarios en los cauces mexicanos. Aplicar el método en dos series de caudales diferentes, cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico, permitió estimar el caudal en ambos estados. De esta forma, fue posible dar solución a la hipótesis planteada al inicio de la presente investigación:

‘Es posible estimar el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas no aforadas, o que no cuenten con un periodo de registro mínimo de 20 años, y sistematizar dicho proceso. Lo anterior, por medio de una regionalización de cuencas y estimación de caudales naturales a través de métodos de clasificación regional’.

CAPÍTULO 10

HYDRA-Eflow

10.1. Introducción

Una vez integradas las bases de datos, se prosigue a diseñar una herramienta informática programada en el lenguaje de cómputo técnico de MATLAB. La herramienta realiza los procesos descritos en ([Arévalo-Mejía, 2015](#)). Adicionalmente, la nueva versión permite:

- Organizar los procesos, módulos, operaciones e información en una sola interfaz gráfica.
- Integrar mapas en formatos raster (*.rst), shape (*.dbf, *.shp, *.shx), tiff (*.tiff), vector (*.vct) por medio del *mapping toolbox* de MATLAB para procesar datos espaciales (e.g: las imágenes interpoladas).
- Realizar análisis de disponibilidad de datos en una cierta región.
- Realizar análisis de calidad estadística en series de tiempo de datos climáticos.
- Visualizar la red de escurrimiento para estimar de caudal ecológico en sitios no aforados.
- Realizar análisis de tendencias Theil Sen para identificar los cambios de las variables climáticas en la región de estudio.
- Integrar bases de datos de especies riparias como bioindicadores de la región de estudio.
- Integrar datos de las obras de regulación (e.g: rol de la obra, gasto de diseño, extracciones, etc.).
- Realizar operaciones de los índices de sustentabilidad de cuencas (ISC) descritos en ([Cervantes-Jiménez, 2015](#)).
- Regionalizar las cuencas mediante un análisis de conglomerados para identificar la región a la que el área en estudio pertenece.
- Estimar el caudal ecológico por medio de modelos de regresión multiparamétrica de las variables explicativas del caudal.
- Actualizar las bases de datos empleadas en la presente investigación.

La herramienta hidro-informática se detalla a través de su manual adjunto en formato digital.

CAPÍTULO 11

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió analizar de manera estructurada y sistemática: i) la alteración hidrológica en las cuencas cuyo parteaguas es obtenido a partir de la estación hidrométrica, así como su correlación con variables socioeconómicas; ii) espacializar información climática a través de métodos geoestadísticos de interpolación para temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación; iii) conocer el estado de la variación climática en México en los últimos treinta años, así como la estimación significativa de las tendencias de cada uno de los índices propuestos en la literatura; iv) analizar las correlaciones geográficas y climáticas para definir grupos de especies por familias, así como la detección de familias vulnerables por efectos de cambio climático; v) regionalizar las cuencas hidrológicas en dos grupos principales: cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico; vi) estimación del caudal ecológico en sitios no aforados a través de métodos de estimación regional de caudales y vii) desarrollar una herramienta informática que permite ordenar, tratar, analizar y modelar la información utilizada en cada labor antes mencionada. Al respecto, se presentan las siguientes conclusiones:

Alteración hidrológica

En el Capítulo 4, se discutió la necesidad de evaluar el estado de la alteración hidrológica de los cauces mexicanos. Se presentó una serie de índices de alteración hidrológica (IAH) que permitieron conocer el estado en cuestión. Al respecto, se realizó una extensión de su evaluación para casos donde la magnitud del régimen hidrológico alterado es superior a la del régimen hidrológico natural. Dichas condiciones se presentan comúnmente en diversas cuencas hidrológicas en México. La información obtenida permitió clasificar las cuencas hidrológicas en cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico para valores habituales, valores máximos y valores mínimos. Los resultados mostraron que gran parte de las cuencas hidrológicas de México se encuentran en condiciones alteradas (554 cuencas). Por otro lado, en el país existe una distribución homogénea de cuencas hidrológicas no alteradas (232 cuencas).

Los IAH permitieron identificar los componentes del régimen que se han modificado en función de los periodos seleccionados como condiciones naturales y alteradas. Sin embargo, la fuente de alteración no puede ser obtenida a través de éstos. Por otra lado, se mostró que las variables socioeconómicas de densidad de población, producto interno bruto y disponibilidad natural per cápita están altamente correlacionados con el estado de alteración de las cuencas hidrológicas. Por lo que el desarrollo poblacional, económico e industrial en México ha impacto en las condiciones del régimen de caudales.

La alta concentración de cuencas alteradas en su régimen hidrológico en México implica complicaciones para considerar al régimen hidrológico natural como un estado deseable, alcanzable y/u operable en dichas áreas. El límite entre las condiciones presuntamente naturales y alteradas será cada vez más difícil de definir al pasar el tiempo. La información natural constituirá una mínima parte en las series de caudales escurridos en los ríos y podría llegar a no ser un estándar aplicable en el futuro.

Espacialización de información climática

En el capítulo 5 se discutió las generalidades, ventajas y desventajas de los métodos geoestadísticos de interpolación para modelar y espacializar la magnitud de las variables climáticas de temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. México cuenta con una extensa red de estaciones climáticas convencionales CLICOM (5,500 estaciones). Sin embargo, sólo el 57.51 % del total de estaciones disponible, se encuentra en condiciones de operación. Lo anterior mengua notoriamente el volumen de información disponible para cualquier análisis climático. Otros factores importantes es la calidad estadística de la información registrada y la carencia de un periodo común con abundante información climática. Esto llevó a seleccionar el periodo de 1980 a 2012 para espacializar la magnitud de las variables climáticas a escala mensual. Al respecto, se recomienda ampliar la red de estaciones climáticas, mejorar la calidad de su información, o bien, analizar posibles condiciones de sesgo de la información disponible por métodos de reanálisis climático.

Las estaciones seleccionadas muestran una estructura espacial estable que fue confirmada por el análisis variográfico realizado con las estaciones de todo el país. Así mismo, se reveló que la ocurrencia de fenómenos meteorológicos como El Niño Oscilación Sur (ENOS) no modifican la estructura del variograma, sino que impacta en el valor de la varianza. Así mismo, el ENOS forma una cavidad cóncava en el variograma.

La ubicación geográfica de México crea tres principales áreas climáticas: i) costa del océano Pacífico; ii) costa del océano Atlántico y iii) altiplano mexicano. Lo anterior causa una notable variación climática local en todo el país. Sin embargo, la estabilidad en la estructura variográfica permitió emplear un solo variograma regional para todo México. En el capítulo de mostró que la variabilidad local del clima está ampliamente correlacionada con la localización geográfica y la topografía del país. Por tal razón, se seleccionó el método de

Kriging con factor de cambio externo (KED kriging) con la finalidad de expresar la variabilidad local en función de la longitud, latitud y altitud. Los resultados mostraron un error medio absoluto menor al obtenido en estudios previos por lo que la aplicación de un solo variograma regional en combinación con el método KED kriging es recomendable en modelaciones futuras.

Por otro lado, se empleó la técnica innovadora de la simulación condicional para generar campos de precipitación a escala mensual. Este método permitió tomar en cuenta la discontinuidad espacial que caracteriza a la precipitación. Sin embargo, al igual que cualquier otro modelo de estimación de lluvia, la confiabilidad de sus resultados depende de una distribución homogénea de estaciones de monitoreo. Los resultados obtenidos por la simulación condicional presentan dos principales ventajas en comparación a la interpolación de kriging: i) permite crear realizaciones consistentes de datos de precipitación que respeten la discontinuidad espacial y ii) expresa el resultado final en función de la distribución acumulada de probabilidad, es decir, es posible conocer la probabilidad de ocurrencia de algún cierto evento seleccionado.

Cambio climático

En el capítulo 6 se analizaron los efectos de cambio climático en México a través de los índices de cambio climático (ICC) propuestos por el ETCCDI. Se estimaron 27 ICCs haciendo uso de la información espacializada en el capítulo 5 para los ICC a escala mensual. Así mismo, se empleó la serie de datos climáticos de Daymet para estimar los ICC a escala diaria. Se obtuvieron imágenes anuales para el periodo 1980 – 2012 y se analizó su tendencia Theil-Sen así como su significancia Mann-Kendall. Los resultados fueron agrupados con base en la variable climática que analizan. De esta forma, se obtuvieron cinco clases de índices: i) temperatura máxima; ii) temperatura mínima; iii) temperatura media; iv) precipitación nula y v) precipitación no nula. Al respecto, se menciona que el grupo de precipitación no nula cuenta con sólo un ICC para analizar la duración del periodo de estiaje. Por tanto, se recomienda tomar en cuenta algún otro ICC que permita evaluar su estacionalidad.

La agrupación de los ICC permitió clasificar la significancia Mann-Kendall en cinco categorías para los grupos de ICC relativos a la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. Su afectación en el país se estimó por los traslapes de cada ICC a nivel de cuenca hidrológica. El estudio mostró consistencia con resultados previstos bajo diferentes escenarios proporcionados por el IPCC: i) la temperatura máxima tiende a incrementarse en el norte de México y decrecer en el sur; ii) la temperatura mínima tiende a disminuir en el norte de México e incrementarse en la costa oeste; iii) la temperatura media muestra tendencias de incrementarse en el norte y decrecer en la península de Yucatán; iv) la duración de la época de estiaje tiende a incrementarse en casi toda la república excepto en la península de Yucatán y

costa de Guerrero en colindancia con Chiapas y v) la precipitación total no nula tiende a disminuir en el norte e incrementarse en el sur.

Este análisis permitió clasificar el riesgo climático de las cuencas de México. De los resultados se concluye que los efectos de cambio climático están presentes en casi todo el territorio nacional. Por tanto, deben elaborarse planes estratégicos flexibles para la adaptación al cambio climático en el menor costo posible tanto económico como en recursos naturales. Se recomienda analizar la posible detonación del cambio climático por efectos de otras variables atmosféricas y/o variables socioeconómicas ya que el análisis mostró las consecuencias más no las fuentes que dan génesis al cambio climático.

Análisis ecológico

El capítulo 7 presentó un análisis ecológico a través de la estimación de la diversidad alfa (D_α) para especies de anfibios, mamíferos y reptiles. Es análisis describió las correlaciones existentes entre la geografía y la climatología local con la distribución potencial de las especies seleccionadas. Así mismo, fue posible identificar las condiciones de temperatura media anual y precipitación media anual que constituyen la distribución espacial de las especies analizadas por familia. Este análisis demostró ser confiable y se recomienda ser empleado para describir dependencias e identificar grupos de familias con base en su D_α . Adicionalmente, se recomienda repetir el procedimiento para especies de peces y aves ya que no se contó con información de sus distribución potencial en las bases de datos del IUCN. Así mismo, se recomienda recopilar una mayor cantidad de información biológica para los cinco grupos de especies.

Por otro lado, fue posible identificar las familias de anfibios, mamíferos y reptiles que son vulnerables a efectos de cambio climático. Estos resultados complementan la clasificación de vulnerabilidad de especies del IUCN y pueden ser empleados para modelos de distribución ecológica. Se recomienda replicar el análisis para los grupos de peces y aves en México.

Regionalización de cuencas hidrológicas

En el capítulo 8 se presentaron diversos métodos de regionalización que permiten clasificar elementos con características homogéneas. En el marco de la investigación, el proceso de regionalización se realizó para las cuencas hidrológicas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico con la finalidad de poder estimar el caudal diario en su estado “natural” y alterado.

Respecto al proceso de regionalización, se realizó a través del método de k-medoids empleando la distancia de Chebychev. La distancia de disimilitud de Chebychev mostró un buen desempeño en la identificación de regiones homogéneas. Por otro lado, se analizó la correlación de las variables empleadas en la regionalización natural. Los resultados mostraron

que la biodiversidad alfa no se encuentra fuertemente correlacionada con alguna otra variable fisiográfica y/o climática. Por tanto, se recomienda que en estudios futuros se emplee alguna variable ecológica que permita describir el sistema hidrológico en estudio.

Por otro lado, el proceso dividido de regionalización, para las cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico, podrá no ser válido en un futuro. Al igual que en el caso de la alteración hidrológica, al pasar el tiempo este umbral perderá consistencia y dejará de tener relevancia operacional. Por tal razón, se recomienda replicar el estudio incluyendo todas las variables empleadas como parte de un solo grupo, donde el ser humano y la naturaleza coexisten como parte de un único sistema. Dicho sistema está constituido por propiedades complejas que pueden ser modeladas, alteradas, preservadas y/o rehabilitadas por el propio ser humano.

Hydra-Eflow

En el capítulo 10, se presenta un resumen de las capacidades de resolución de la herramienta hidro-informática Hydra-Eflow para estimar el caudal ecológico en cuencas no aforadas. Se empleó el lenguaje de cómputo técnico Matlab para crear todas las rutinas y la interfaz gráfica de la herramienta. Al respecto, se concluye que el lenguaje de cómputo técnico Matlab es idóneo para el tipo de operaciones necesarias para el desarrollo y obtención de resultados de la investigación. Así mismo, todas las operaciones espaciales se realizan con una mejor eficacia en comparación a otras herramientas informáticas orientadas a los Sistemas de Información Geográfica (SIG, por sus siglas en inglés; e.g: ArcGis, TerrSet). Sin embargo, Matlab presenta dos desventajas principales: i) requiere la adquisición de la licencia original, así como de una cantidad cuantiosa de *toolboxes* y ii) el motor gráfico del *mapping toolbox* no tiene la misma calidad que otros lenguajes de programación (e.g: Grass de Qgis programado en Python).

El desarrollo de la herramienta hidro-informática Hydra-Eflow está orientado a asistir la estimación del caudal ecológico en sitios no aforados. Sin embargo, la herramienta permite obtener gráficas, estadísticas, mapas y realizar análisis que puede ser realizados de forma independiente para otro tipo de estudios. El desarrollo de tecnología propia para la nación presenta diversas ventajas económicas, sociales y científicas. Una de las tantas ventajas es que se puede seguir implementando nuevas rutinas, operaciones y/o métodos que se acoplen a las necesidades de los estudios hidrológicos, climáticos y/o ecológicos de México.

Conclusión general

Las actividades humanas para el desarrollo económico, científico, tecnológico y social han modificado notoriamente las condiciones de los ecosistemas riparios y terrestres de la Tierra. Su influencia ha desatado una serie de extinciones masivas de ciertas especies dependientes del recurso hídrico. Por tal razón, existe un fuerte debate en la comunidad científica por

reemplazar el término de la época geológica del Holoceno por Antropoceno. De esta forma, se declara al ser humano como principal responsable de las alteraciones climáticas, hidrológicas y ecológicas. Dicha responsabilidad incluye establecer las condiciones deseables del capital ecológico, gestionar su inclusión como restricción (en algunos casos) del desarrollo económico, tecnológico e industrial hasta insertarse dentro de la cultura y educación de la sociedad.

El trabajo realizado muestra suficiente evidencia de la correlación existente entre diversas variables socioeconómicas con el estado en cuestión de los componentes del régimen hidrológico, variaciones climáticas y sus impactos en familias de especies de tres grupos analizados. Así mismo, brinda aportaciones científicas y tecnológicas mediante la sistematización del método adaptado durante la investigación. Adicionalmente, se ha reflexionado sobre la validez del paradigma natural de caudales en el mediano y largo plazo. En México, existen cuencas donde no se puede prescribir un caudal ecológico con base en las condiciones presuntamente naturales. En cuyos casos, la sociedad, las instituciones gestoras de los recursos naturales, tomadores de decisión y la comunidad científica deben plantearse las preguntas: ¿qué condiciones deseamos del estado de nuestro capital natural? La respuesta debe ser apoyada por todos los sectores, deseada, anhelada y realizar lo necesario para lograrla.

Por lo anterior, se recomienda fuertemente incrementar las redes de monitoreo existentes, implementar nuevas redes de monitoreo (e.g: parámetros fisicoquímicos en los cauces mexicanos), sistematizar la recolección de información multivariada para modelos futuros, así como mejorar la calidad de la información disponible. Un mejor monitoreo de nuestro ambiente físico permitirá identificar con antelación una mayor cantidad de anomalías. Así mismo, permitirá identificar nuevas correlaciones y clasificarlas en causas-consecuencias. Finalmente, el propósito del paradigma natural de caudales es establecer un umbral y condiciones de referencia deseables. Sin embargo, el desarrollo económico, industrial y poblacional del ser humano ha modificado gran parte de las condiciones naturales de ríos, clima y ecosistemas. Por ello, se recomienda continuar con posibles investigaciones futuras con el objetivo de modelar las correlaciones causa-consecuencia para desarrollar escenarios socio-eco-hidrológicos como parte de un solo sistema.

Uno, de los muchos aportes de la investigación, es que en ella se integró un sistema multivariable para darle una visión semi holística al problema del caudal ecológico. La integración, selección, tratamiento y aplicación de la información crea problemas científicos y técnicos cuyas soluciones ayudaron a mejorar la visión del caudal ecológico en México.

Por todo lo anterior, se acepta la hipótesis de la investigación: es posible estimar el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas no aforadas, o que no cuenten con un periodo de registro mínimo de 20 años, y sistematizar dicho proceso. Lo anterior, por medio de una regionalización de cuencas y estimación de caudales naturales a través de métodos de clasificación regional.

CAPÍTULO 12

PERSPECTIVAS

La presente investigación brindó la información y análisis global para conocer las correlaciones de diversos factores sobre el caudal ecológico. Por tanto, se brindan las siguientes perspectivas como posibles trabajos futuros.

Alteración hidrológica

Respecto al análisis de alteración hidrológica, se recomienda que las futuras investigaciones se enfoquen, a manera de complementación del trabajo, en cuatro puntos importantes: i) incluir algún índice de alteración hidrológica (IAH) que permita evaluar la tasa de cambio de manera inter e intranual del caudal diario; ii) si bien, el paradigma de natura de caudales tiene tendencias poco operacionales en el futuro, el uso de los IAH facilitan el desarrollo de escenarios hidrológicos que pueden ser tomados en consideración dentro de la gestión del caudal en las obras de regulación; iii) se cuenta con la información necesaria para analizar y, en caso necesario, justificar una iniciativa que replanté los objetivos ambientales señalados en la normatividad mexicana para la estimación del caudal ecológico a nivel de cuenca hidrológica y iv) estudios que busquen posibles detonadores de la alteración hidrológica (e.g: cambio de uso de suelo).

Espacialización de información climática

Por el lado de la espacialización de información climática, la modelación de cualquiera de las tres temperaturas (media, máxima y mínima) se realizó por el método de Kriging con factor de cambio externo (KED kriging). La estimación mostró niveles de error menores que los obtenidos en estudios previos. Sin embargo, se considera que la estimación podría mejorar al mediante regresiones multivariantes de orden superior. Es decir, la investigación consideró una regresión multivariable de primer grado, se recomienda expandir la matriz de KED kriging para analizar regresiones de orden superior. Por otro lado, los principios científicos de la

simulación condicional pueden ser aplicados en fenómenos caracterizados por la discontinuidad espacial.

Cambio climático

El análisis de cambio climático mostró la variación climática y sus tendencias a través de la información climática de los últimos treinta años en México. En este análisis se empleó la pendiente Theil-Sen para modelar la tendencia climática. Sin embargo, su uso supone que el fenómeno analizado presenta un comportamiento lineal, lo cual, podría dejar de ser funcional en el futuro si el comportamiento de la tendencia cambia. Por tanto, se podrían realizar estudios de análisis y modelación de tendencias bajo diferentes modelos matemáticos. Adicionalmente, se pueden mejorar los resultados climáticos mediante métodos de reanálisis climático.

Análisis ecológico

La ecología y las relaciones presentes entre la coexistencia de las poblaciones de especies y con su hábitat presentan una fuente rica de investigación y desarrollo científico y tecnológico. Dentro del marco de investigación, se identificó que se puede desarrollar investigación con los siguientes fines: i) aplicar los principios de los campos gaussianos para simular modelos de distribución potencial de especies; ii) mejorar y/o sistematizar la recolección de datos ecológicos con ayuda de la tecnología existente, ya que son requeridos en modelos ecológicos más robustos; iii) aplicar y desarrollar nuevos métodos de análisis estadístico (e.g: redes Bayesianas, minería de datos, redes neuronales, etc.) para definir posibles relaciones causa-efecto entre las especies y variaciones en su hábitat.

Regionalización

En el marco de la investigación, se consideró apropiado regionalizar por separado las cuencas alteradas y no alteradas en su régimen hidrológico ya que esto permitió estimar las series de caudales en el Capítulo 9. Sin embargo, es posible que esta visión deje de ser operacionalmente adecuada en el futuro al alejarnos de las condiciones naturales en el tiempo. Por tanto, se puede mejorar el análisis considerando los dos sistemas de cuencas como un solo sistema que requiere plantear objetivos ambientales, planes tácticos y acciones contundentes para lograr preservar y/o rehabilitar el estado del hábitat.

Estimación de caudal ecológico en sitios no aforados

La estimación del caudal ecológico en sitios no aforados se realizó a través del método de regresión regional propuesto por Requena et al. (2017). Aún cuando los resultados mostraron

una alta eficiencia en la estimación de series de caudales, se puede plantear una mejora importante en el método: adaptar la visión de distancias dependientes de la agregación de cuencas de Top-kriging al método de regresión regional, ya que éste último emplea la distancia inversa ponderada.

Hydra-Eflow

En el marco de la investigación se creó la herramienta hidro-informática Hydra-Eflow para estimar el caudal ecológico en cuencas no aforadas. Esta herramienta permite analizar, filtrar y tratar la información fuente que será empleada en algunas de sus rutinas. La herramienta hidro-informática Hydra-Eflow podría seguir desarrollándose para que, en el futuro cercano, sea posible modelar sistemas socio-eco-hidrológicos complejos y desarrollar una variedad de escenarios que podrían ser útiles en la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) así como para los tomadores de decisiones.

Retribución social

Durante la investigación se generó la información suficiente para la publicación de sus resultados en revistas de categoría nacional e internacional. Se enlistan por prioridad algunas posibles publicaciones relacionadas a los hallazgos de la investigación:

- Evaluation of hydrologic alteration. Study case in the Mexican basins.
- A desktop hidro-informatics tool to assist environmental flow allocation.
- A semi-holistic perspective for freshwater allocation. Study case in Mexico.
- Detection of vulnerable species families to climate variability in Mexico.
- Water balance components maps in Mexico: a geostatistical approach.
- Application and comparison of regional flow and geostatistical approaches. Study case in Mexico.
- Regionalization of non-altered basins in Mexico.
- Regionalization of altered basins in Mexico.
- Climate trend analysis in the past thirty years in Mexico.

NOMENCLATURA

AH	Alteración hidrológica
BBM	<i>Building Block Methodology</i>
CAWMA	<i>Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture</i>
CBD	Convención en Diversidad Biológica
CONABIO	Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DRIFT	<i>Downstream Response to Imposed Flow Transformation</i>
ELOHA	<i>Ecological Limits Of Hydrologic Alteration</i>
ETCCDI	<i>Expert Team on Climate Change Detection and Indices</i>
IAHRIS	Índices de Alteración Hidrológica en Ríos
IAH	Índice de alteración hidrológica
IAHi	Índice de alteración hidrológica parcial i
IAHG _i	Índice de alteración hidrológica global i
ICC	Índice de Cambio Climático
CLICOM	<i>Climate Computing</i>
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
IFIM	<i>Instream Flow Incremental Methodology</i>
NEFM	<i>New England Flow Method</i>
NGPRP	<i>Northern Great Plains Resource Program</i>
PHABSIM	<i>Physical Habitat Simulation Model</i>
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua
RHA	Régimen hidrológico alterado
	Región hidrológica administrativa
RHABSIM	<i>Riberine Habitat Simulation Model</i>
RHN	Régimen hidrológico natural
DOF	Diario Oficial de la Federación
IUCN	<i>International Union for Conservation of Nature</i>
WCD	<i>World Commission on Dams</i>
SSP	Sistema de Seguridad de Presas
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LAN	Ley de Aguas Nacionales
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
Irstea	<i>Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture</i>
IAHRIS	Índices de Alteración Hidrológica en Ríos
RHA	Región Hidrológico-Administrativa
$(AA_{año i})_{RHA}$	Aportación anual en régimen alterado
$(AA_{año i})_{RHN}$	Aportación anual en régimen natural
$(Am_{mes i, año j})_{RHA}$	Aportación mensual del mes i del año j en régimen alterado
$(Am_{mes i, año j})_{RHN}$	Aportación mensual del mes i del año j en régimen natural

Q_{10}	Caudal con probabilidad de excedencia del 10% en la curva de duración de caudales
Q_{90}	Caudal con probabilidad de excedencia del 90% en la curva de duración de caudales
Am mínima	Aportación mensual mínima
Am máxima	Aportación mensual máxima
$(\bar{Q}c)_{RHA}$	Media de los máximos caudales medios diarios anuales en RHA
$(\bar{Q}c)_{RHN}$	Media de los máximos caudales medios diarios anuales en RHN
Q_{MCO}	Caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria
$CV(Qc)$	Coefficiente de variación de los máximos caudales medios diarios anuales
Q_{GL}	Caudal generador del lecho
Q_{GLRHA}	Caudal generador del lecho en condiciones alteradas
Q_{GLRHN}	Caudal generador del lecho en condiciones naturales
$T_{(Q_{CONEC})RHA}$	Período de retorno correspondiente al caudal de conectividad en régimen alterado
$T_{(Q_{CONEC})RHN}$	Período de retorno correspondiente al caudal de conectividad en régimen natural
$Q_{5\%RHN}$	Avenida habitual en régimen natural
$Q_{5\%RHA}$	Avenida habitual en régimen alterado
$CV(Q_{5\%RHN})$	Coefficiente de variación de la serie de caudales de avenida habitual en régimen natural
$CV(Q_{5\%RHA})$	Coefficiente de variación de la serie de caudales de avenida habitual en régimen alterado
$\bar{Q}s_{RHA}$	Media de los caudales diarios mínimos anuales en régimen alterado
$\bar{Q}s_{RHN}$	Media de los caudales diarios mínimos anuales en régimen natural
$Q_{95\%RHA}$	Caudal correspondiente a la sequía habitual en régimen alterado
$Q_{95\%RHN}$	Caudal correspondiente a la sequía habitual en régimen natural
$CV(Qs_{RHA})$	Coefficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales en régimen alterado
$CV(Qs_{RHA})$	Coefficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales en régimen natural
$IAH_i^{Húmedo}$	Índice de alteración hidrológica para condiciones húmedas
IAH_i^{Medio}	Índice de alteración hidrológica para condiciones medias
IAH_i^{Seco}	Índice de alteración hidrológica para condiciones secas
\bar{Q}_A	Caudal medio anual
RH	Región Hidrológica
$\hat{V}(x_0)$	Valor estimado en el punto x_0
w_{i0}	Peso ponderado del punto x_i con respecto al punto x_0
$V(x_i)$	Valor observado en el punto x_i
d_{i0}	Distancia euclidiana entre el punto x_i y el punto x_0
$\gamma(h)$	Variograma en función de la distancia h
Var	Varianza
$E\{\rho\}$	Esperanza matemática del argumento ρ

μ	Media
$C(h)$	Covarianza en función de la distancia h
γ_{ij}^*	Disimilitud entre los puntos x_i y x_j
$N(h)$	Número de puntos x_i, x_j con distancia de separación h
$\gamma^*(h)$	Variograma experimental
$\gamma_{a,C_0,C_1}^{nug}(h)$	Variograma de efecto <i>nugget</i> con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$C_{a,C_0,C_1}^{nug}(h)$	Covarianza de efecto <i>nugget</i> con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$\gamma_{a,C_0,C_1}^{sph}(h)$	Variograma esférico con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$C_{a,C_0,C_1}^{sph}(h)$	Covarianza esférica con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$\gamma_{a,C_0,C_1}^{exp}(h)$	Variograma exponencial con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$C_{a,C_0,C_1}^{exp}(h)$	Covarianza exponencial con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$\gamma_{a,C_0,C_1}^{gau}(h)$	Variograma gaussiano con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$C_{a,C_0,C_1}^{gau}(h)$	Covarianza gaussiana con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$\gamma_{a,C_0,C_1}^{mat}(h)$	Variograma de Matern con rango a , pepita C_0 y silo C_1
$C_{a,C_0,C_1}^{mat}(h)$	Covarianza de Matern con rango a , pepita C_0 y silo C_1
K_v	Función de biselado
$\Gamma(v)$	Función gamma
w_i	Peso ponderado del dato observado x_i
m_R	Media de errores
$R(x_0)$	Error en el punto x_0
$\tilde{\sigma}_R^2$	Varianza de Kriging
Cov	Covarianza
r_i	Error en la estimación
\mathcal{L}	Multiplicador de Lagrange
$f_k(x_i)$	Función como factor de cambio externo en el punto x_i
$Y(x_i)$	Función aleatoria residual
X	Regresión lineal multivariable
α, β, ω	Parámetros de regresión multivariable
ε	Residuos de la regresión lineal multivariable
CA	Campo aleatorio
$S(x)$	Realización de simulación para la variable x
TBM	<i>Turning Bands Methodology</i>
D_t	Banda turnante t
u_t	Vector unitario de la banda turnante D_t
s_t	Abscisa de D_t centrada al origen
M_f	Media de valores estimados
M_o	Media de valores observados
B	Bias
MSE	Error cuadrático medio
$RMSE$	Raíz del error cuadrático medio
MAE	Error medio absoluto
$RMAE$	Error medio absoluto relativo
$NASH$	Índice de NASH
$SAMPO$	<i>Simulation of Advected Mesoscale Precipitation and their Occurance</i>

FAE	Función aleatoria estacional
FAI	Función aleatoria intrínseca
$I(x, t)$	Campo de intermitencia de lluvia en el punto x y tiempo t
λ	Cuantil gaussiano correspondiente a la fracción de área seca
$R_I(x_E, t)$	Campo de lluvia intermitente en el punto x_E y tiempo t
φ	Anamorfosis de la distribución de probabilidad
CO_2	Dióxido de carbono
N_2	Nitrógeno
O_3	Ozono
CH_4	Metano
CFC	Clorofluorocarbonatos
CFCH	Clorofluorocarbonatos hidrogenados
N_2O	Óxido nitroso
SO_2	Dióxido de azufre
H_2O	Agua
H_2CO_3	Ácido carbónico
H^+	Ión hidrógeno
HCO_3^-	Ión bicarbonato
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
$^{\circ}C$	Grados Celcius
T_{min}	Temperatura mínima
T_{max}	Temperatura máxima
T_m	Temperatura media
FDO	Número de días fríos
SU25	Número de días cálidos
ID0	Número de días gélidos
TR20	Número de noches tropicales
GSL	Duración del crecimiento de temporada
TXx	Máximo mensual de la temperatura máxima diaria
TNx	Máximo mensual de la temperatura mínima diaria
TXn	Mínimo mensual de la temperatura máxima diaria
TNn	Mínimo mensual de la temperatura mínima diaria
TN10p	Porcentaje de días con $T_{min} < P_{10Tmin}$
TX10p	Porcentaje de días con $T_{max} < P_{10Tmax}$
TN90p	Porcentaje de días con $T_{min} > P_{90Tmin}$
TX90p	Porcentaje de días con $T_{max} > P_{90Tmax}$
WSDI	Índice de duración de onda de calor
CSDI	Índice de duración de onda de frío
DTR	Rango de temperatura diaria
Rx1d	Precipitación máxima mensual de 1 día
Rx5d	Precipitación máxima mensual de 5 días consecutivos
SDII	Índice de intensidad de precipitación
R10	Número de días con precipitación intensa
R20	Número de días con precipitación muy intensa
Rnn	Número de días con precipitación mayor que nn mm
CDD	Máxima duración de la temporada de estiaje
CWD	Máxima duración de la temporada de lluvia

R95p	Precipitación total de días muy húmedos
R99p	Precipitación total de días extremadamente húmedos
R _{tot}	Precipitación total anual
m_{T-S}	Pendiente Theil-Sen
Z_{MK}	Estadístico de Mann-Kendall
AA_{CC}	Porcentaje de afectación de área por efectos del cambio climático
TPC	Tablas de probabilidad condicional
ML	Machine Learning
D_α	Diversidad alfa
D_β	Diversidad beta
D_γ	Diversidad gama
$d(x_{ki}, x_{kj})$	Distancia entre el elemento i y j del <i>cluster</i> k
CP	Coefficiente de partición
ID	Índice de Dunn
S	Índice silhouette
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
A	Área de cuenca
P	Perímetro de cuenca
E_mC	Elevación media de la cuenca
M_mC°	Pendiente media de la cuenca en grados
M_mC	Pendiente media de la cuenca en porcentaje
K_c	Coefficiente de compacidad
R_{ci}	Relación de circularidad
RH	Relación hipsométrica
T_cK	Tiempo de concentración de Kirpich
T_cC	Tiempo de concentración de CHPW
L_c	Longitud del río principal
L_a	Longitud directa del río principal
S_h	Coefficiente de sinuosidad
$E_{máx}$	Elevación máxima del río principal
$E_{mín}$	Elevación mínima del río principal
M_mR	Pendiente media del río principal
P_m	Precipitación media anual
T_m	Temperatura media anual
$D_\alpha A$	Diversidad alfa de anfibios
$D_\alpha M$	Diversidad alfa de mamíferos
$D_\alpha R$	Diversidad alfa de reptiles
Dn	Disponibilidad natural media per cápita
IDH	Índice de desarrollo humano
PIB	Producto interno bruto
PEA	Población económicamente activa
Pob	Densidad de población
P^+	Porcentaje de área afectada en la cuenca por incrementos en precipitación
P^-	Porcentaje de área afectada en la cuenca por decrementos en precipitación
T_m^+	Porcentaje de área afectada en la cuenca por incrementos en T_m
T_m^-	Porcentaje de área afectada en la cuenca por decrementos en T_m
T_x^+	Porcentaje de área afectada en la cuenca por incrementos en $T_{máx}$

T_x^-	Porcentaje de área afectada en la cuenca por decrementos en $T_{\text{máx}}$
T_n^+	Porcentaje de área afectada en la cuenca por incrementos en $T_{\text{mín}}$
T_n^-	Porcentaje de área afectada en la cuenca por decrementos en $T_{\text{mín}}$
S^+	Porcentaje de área afectada en la cuenca por incrementos en sequía
S^-	Porcentaje de área afectada en la cuenca por decrementos en sequía
V_A	Media de las variables aleatorias en el área A.
CDC	Curva de duración de caudales
V_1, V_2, \dots, V_n	Descriptores físicos en regresión <i>stepwise</i>
$Q_{p,j}$	Caudal diario correspondiente al p-ésimo percentil de la estación j
CDC_j	Curva de duración de caudal regionalizada de la estación j
$Q^{d,j}$	Caudal diario estimado de la estación j
Q^d	Caudal diario estimado en el sitio sin aforo

REFERENCIAS

- World Commission on Dams. (2000). *Dams and development: a new framework for decision-making*. United States: Earthscan.
- Aburto-Oropeza, O., Johnson, A., Agha, M., Allen, E., Allen, M., Arellano-González, J., & et al. (2018). Harnessing cross-border resources to confront climate change. *Environ. Sci. and Pol.*, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.001>.
- Acreman, M. (2016). Environmental flows - basics for novices. *WIREs Water* doi: 10.1002/wat2.1160.
- Acreman, M. C., Blake, J. R., Booker, D. J., Harding, R. J., Reynard, N., Mountford, J. O., & Stratford, C. J. (2009). A simple framework for evaluating regional wetland ecohydrological response to climate change with case studies from Great Britain. *Ecohydrology*, 2, 1-17.
- Acreman, M., & Dunbar, M. (2004). Defining environmental flow requirements - a review. *Hydrology and Earth System Sciences*; 8(5), 861-876.
- Acreman, M., Arthington, A., Colloff, M., Couch, C., Neville, D., Dyer, F., . . . Young, W. (2014). Environmental flows for natural, hybrid, and novel riverine ecosystems in a changing world. *Ecol Environ.* 12 (8), 466-473.
- Acreman, M., Overton, I., King, J., Wood, P., Cowx, I., Dunbar, M., . . . Young, W. (2014). The changing role of ecohydrological science in guiding environmental flows. *Hydrological Sciences Journal*; 59 (3-4), 433-450.
- Adams, J. A. (2014). A review of methods and frameworks used to determine the environmental water requirements of estuaries. *Hydrological Sciences Journal*; 59(3-4), 451-465.
- Ahrens, C. (2003). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont, CA: Brooks/Cole.
- Alfro, M. (1979). *Étude de la robustesse des simulations de fonctions aléatoires*. Doctoral thesis, E.N.S. des Mines de Paris.
- Alonso Eguía Lis, P. E., Gómez Balandra, M. A., & Saldaña Fabela, P. (2007). *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. México: SEMARNAT.
- Alonso-Eguía Lis, P. E., Gómez Balandra, M. A., & Saldaña Fabela, P. (2007). *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. México: IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-SEMARNAT.
- Annear, T., Chisholm, I., Beecher, H., Locke, A., Aarrestad, P., Burkhard, N., & et al. (2004). *Instream flows for riverine resource stewardship*. Cheyenne, Wyoming: Instream Flow Council.
- Appendini, C., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R., & Kurczyn, J. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>.
- Araujo, M., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, I., & Williams, P. (2004). Would climate change drive species out of reserve? An assessment of existing reserve-selection methods. *Glob. Change Bio.* 10, 1618-1626.
- Arévalo-Mejía, R. (2015). *Desarrollo de herramienta informática para determinar el caudal ecológico en cuencas aforadas. Tesis de maestría*. Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua.
- Arévalo-Mejía, R., Díaz-Delgado, C., Leblois, É., Mastachi-Loza, C. A., Bâ, K., & Salinas-Tapia, H. (2018). *Hydra-Eflow v1.0*. México.
- Arias, M., Lee, E., Farinosi, F., Pereira, F., & Moorcroft, P. (2018). Decoupling the effects of deforestation and climate variability in the Tapajós river basin in the Brazilian Amazon. *Hydrological processes*. 32(11), 1648-1663.
- Arthington, A. (2012). *Environmental flows: saving rivers in the third millennium*. Berkeley, California: University of California Press.
- Arthington, A. H. (1998). *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of holistic methodologies*. Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra, Australia.
- Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*; (16), 1311-1318.
- Auerbach, D., Poff, N., McShane, R., Merritt, D., Pyne, M., & Wilding, T. (2012). Streams past and future: fluvial responses to rapid environmental change in the context of historical variation. In J. Wiens, G. Hayward, H. Safford, & C. Griffen, *Historical environmental variation in conservation and natural resource management* (pp. 232-245). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Bâ, K. (2016). Environmental flow and hydrologic alteration on gauged basins. Mali.

- Baez-González, A., Kiniry, J., Melki, M., Williams, J., Álvarez-Cilva, M., Ramos-González, J., & Magallanes-Estala, A. (2018). Potential impact of future climate change on sugarcane under dryland conditions in Mexico. *Clim. Change*, DOI: 10.1111/jac.12278.
- Balasko, B., Abonyi, J., & Feil, B. (2005). Fuzzy clustering and Data Analysis Toolbox. Veszprem, Hungaria.
- Bárdossy, A., & Plate, E. (1991). Modeling daily rainfall using a semi-Markov representation of circulation pattern occurrence. *Journal of Hydrology*. 122(1), 33-37.
- Bayley, P. B. (1995). Understanding large river-floodplain ecosystem. *BioScience* 45(3), 154-158.
- Beaudelin, P., & Bérubé, P. (1994). *Cadre d'analyse des projets de petites centrales hydroélectriques*. Ministère de l'Environnement et de la Faune. 4 sections et 4 annexes.
- Begon, M., Harper, J. L., & Townsend, C. R. (1987). *Ecology; Individuals, Populations and Communities*. Blackwell Sci.
- Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V. D., & Leclerc, M. (1997). *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec*. INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans, Canada.
- Berzal, F. (2018, Agosto 15). *Clustering*. Retrieved from <https://elvex.ugr.es/decsai/intelligent/slides/dm/D3%20Clustering.pdf>
- Bezdek, J. (1981). *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Plenum Press.
- Bezdek, J., & Dunn, J. (1975). *Optimal fuzzy partitions: a heuristic for estimation of the parameters in a mixture of normal distributions*. IEEE Transactions on computers.
- Bierman, P., & Montgomery, D. (2013). *Key concepts in geomorphology*. McMillan Learning.
- Blake, D., Sunthornratana, U., Promphakping, B., Bauphuan, S., Sarkkula, J., Kumm, M., & et al. (2011). *E-flows in the Nam Songkhram River Basin. Final Report*. M-POWER Mekong Program on Water, Environment and Resilience, IUCN, IWMI, CGIAR Challenge Program on Water and Food, Aalto University, Finland.
- Bond, N., Grigg, N., Roberts, J., McGinness, H., Nielsen, D., O'Brien, M., . . . Stratford, D. (2018). Assessment of environmental flow scenarios using state-and-transition models. *Freshwater Biology*, 1-13.
- Boulton, A. (1999). An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis. *Freshwater Biology*; (41), 469-479.
- Bovee, K. D. (1982). *A guide to instream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Fish and Wildlife Services, Office of Biology Services, Washington D.C.
- Bovee, K. D. (1986). *Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in instream flow incremental methodology*. Reporte presentado para: U.S. Fish and Wildlife Service, 86(7).
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J., & Henriksen, J. (1998). *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Geological Survey, Information and Technology.
- Bowen, Z. H., Bovee, K. D., & Waddle, T. J. (2003). Effects on flow regulation on shallow-water habitat dynamics and floodplain connectivity. *Fisheries and Society*; (29), 365-374.
- Brein, K., Turkington, T., & Stowasser, M. (2015). Simulating daily precipitation and temperature: a weather generation framework for assessing hydrometeorological hazard. *Meteorological Applications*. 22(3), 334-347.
- Brisbane Declaration. (2007). The Brisbane Declaration. In: *10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference*. Brisbane, Australia.
- Brown, C., & King, J. M. (2003). *Environmental flows: concepts and methods*. The World Bank, The International Bank for Reconstruction and Development, Washington D. C.
- Buishand, T., J.J. Beersma, R., Sluiter, R., & Kroon, T. (2008). *Definitiestudie rasterdata meteorologie*. De Bilt, KNMI / RWS Waterdienst.
- Bunn, S., & Arthington, A. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental management*; 30(4), 492-507.
- Caissie, D., El-Jabi, N., & Alexander, D. R. (1994). Données sur les débits réservés au Canada. *Atlantique Rapp. Stat. Can. Sci. Halieut. Aquat* (946), 87.
- Carlisle, D., Wolock, D., & Meador, M. (2011). Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment. *Front. Ecol. Environ.* 9, 264-270.
- CAWMA. (2007). Water for food, water for life: a Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. In International Water Management Institute (Ed.), *Comprehensive Assessment of Water management in Agriculture*. Londres.
- Cervantes-Jiménez, M. (2015). *Propuesta metodológica de un índice de sustentabilidad de la gestión de los recursos hídricos en cuencas urbanas. Tesis doctoral*. Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de recursos del Agua, México.

- Cervantes-Jiménez, M., Mastachi-Loza, C., Díaz-Delgado, C., Gómez-Albores, M., & González-Sosa, E. (2017). Socio-ecological regionalization of the urban sub-basins in Mexico. *Water*, doi:10.3390/w9010014.
- Chen, S. (2018). *Stochastic simulation of near-surface atmospheric forcings for distributed hydrology*. Grenoble. : Doctoral thesis. .
- Chentsov, N. (1957). Lévy Brownian motion for several parameters and generalized white noise. *Theory of Probability and Its Applications*, 2(2), 265-266.
- Chiang, S. L., & Johnson, F. W. (1976). Low flow criteria for diversion and impoundments. *Water Resources; (102)*, 227-238.
- Chiang, S., Tsay, T., & Nix, S. (2002). Hydrologic regionalización of watersheds. I: Methodology Development. *Journal of Water Resources*. 128(1), 3-11.
- Chilès, J., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: modelling spatial uncertainties*. John Wiley & Sons. Ltd.
- Cimera Estudios Aplicados S.L. (2015). *Bioindicadores*. Retrieved Enero 09, 2015, from <http://www.cimera.es/plantas-macrofitas-acuaticas-bioindicadores-contaminacion>
- CIS-WFD. (2003). *Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters. Final report (7.0)*. Common Implementation Strategy - Water Framework Directive.
- CIS-WFD. (2003). *Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters*. Water Framework Directive.
- Clarke, J. (2005). Why environmental scientists are becoming Bayesians. *Ecol. Lett.* 8, 2-14.
- CONABIO. (2015a). *¿Qué es un país megadiverso?* Recuperado el 05 de Enero de 2015, de <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/quees.html>
- CONABIO. (2015b). *Especies endémicas de México*. Recuperado el 05 de Enero de 2015, de <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/endemicas/endemicas.html>
- CONAGUA. (2015). *Atlas digital del agua México 2015*. Retrieved marzo 03, 2017, from www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf
- CONAGUA. (2016). *Sistema de Seguridad de Presas*. Retrieved abril 28, 2016, from <http://www.conagua.gob.mx/sisp/>
- CONAGUA. (2017, 05 12). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Retrieved 05 12, 2017, from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*; 6, 37-46.
- Cowx, I. G., & Portocarrero, M. (2011). Paradigm shifts in fish conservation: moving to the ecosystem services concept. *Journal of Fish Biology*; (79), 1663-1680.
- Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.
- Crowder, D. W., & Diplas, P. (2006). Applying spatial hydraulic principles to quantify stream habitat. *River Research and Applications*; (22), 103-111.
- Cruz-Cárdenas, G., Silva, J., Ochoa-Estrada, S., Estrada-Godoy, F., & Nava-Velázquez, J. (2017). Delineation of environmental units by multivariate techniques in the Duero river watershed, Michoacán, Mexico. *Environ. Model Assess.* 22, 257-266.
- Cuervo-Robayo, A., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M., Venegas-Barrera, C., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2013). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of CLimatology*. , DOI: 10.1002/joc.3848.
- Currie, D. (1991). Energy and large-scale biogeographical patterns of animal and plant species richness. *American Naturalist*. 137, 27-49.
- Cutzen, P., & Stoermer, E. (2000). The anthropocene. *Global change newsletter*. 41, 17-18.
- Davies, P., Naiman, R., Warfe, D., Pettit, N., Arthington, A., & Bunn, S. (2014). FLOW-ecology relationships: closing the loop on effective environmental flows. *Mar. Fresh. Res.* 65, 133-141.
- De Smedt, P. (2010). The use of impact assessment tools to support sustainable policy objectives in Europe. *Ecology and Society*; 15(4), 30.
- Dobesch, H., Dumolard, P., & Dyras, I. (2007). *Spatial Interpolation for Climate Data: The use of GIS in Climatology and Meteorology*. Reino Unido: ISTE.
- DOF, D. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México.
- DOF, D. (1992). *Ley de Aguas Nacionales*. México.
- DOF, D. (2012). *NMX-AA-159-SCFI-2012: Norma oficial mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. México.
- DOF. (2012). *Ley general de cambio climático*. México: Diario Oficial de la Federación.

- Döll, P., & Zhang, J. (2010). Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alteration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 783-799.
- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 2413-2432.
- Driver, P., Chowdhury, S., Wettin, P., & Jones, H. (2005). Models to predict the effects of environmental flow releases on wetland inundation and the success of colonial bird breeding in the Lachlan River, NSW. *Proceedings of the 4th Australian Stream Management Conference: Linking rivers to Landscapes.* (pp. 192-198). Launceston, Tasmania: Tasmanian Department of Primary Industries, Water and Environment.
- Dubrule, O. (1983). Cross validation in kriging with a unique neighborhood. *Journal of the International Association for Mathematical Geology.* 15(6), 687-699.
- Durance, I., & Ormerod, S. (2007). Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. *Glob. Chang Biol.* 13, 942-957.
- Duvail, S., Mwakalinga, A. B., Eijkelenburg, A., Hamerlynck, O., Kindinda, K., & Majule, A. (2014). Jointly thinking the post-dam future: exchange of local and scientific knowledge on the lakes of the Lower Rufiji, Tanzania. *Hydrological Sciences Journal;* 59(3-4), 713-730.
- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scarlon, J. (2003). *Flow - The essentials of environmental flows* ((2da. Ed.) ed.). Reino Unido: Glad, Switzerland: IUCN.
- Ebert, D. J., Filipeck, S. P., & Russell, K. M. (1990). *Stream habitat analysis and instream flow assessment: a state-federal effort in Arkansas.* U.S. Fish and Wild Services.
- Emerton, L., & Bos, E. (2004). *Value. Counting ecosystems as an economic part of water infrastructure.* Gland: IUCN.
- Ergen, K., & Kentel, E. (2016). An integrated map correlation method and multiple-source sites drainage-area ratio method for estimating streamflows at ungauged catchments: A case study of the Western Black Sea Region, Turkey. *J. Environ. Manage.* 166, 309-320.
- Expert Team on Climate Change Detection and Indices. (2015). *Climate change indices.* Retrieved Mayo 20, 2015, from http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- Eymen, A., & Köylü, Ü. (2018). Seasonal trend analysis and ARIMA modeling of relative humidity and wind speed time series around Yamula Dam. *Meteorology and Atm. Physics,* 1-12.
- Fall, C., Hinojosa-Peña, A., & Carreño-de-León, M. (2007). Design of a monitoring network and assessment of the pollution on the Lerma river and its tributaries by wastewaters disposal. *Science of the Total Environment.* 373, 208-219.
- FAO. (2018, October 10). *AGRIS.* Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PH2002000836>
- Farmer, W., Over, T., & Vogel, R. (2015). Multiple regression and inverse moments improve the characterization of the spatial scaling behaviour of daily streamflows in the Southeast United States. *Water Resour. Res.* 51, 1775-1796.
- Fernández Yuste, J. (2003). Régimen ambiental de caudales y morfología fluvial. *Curso sobre régimen ambiental de caudales.* Universidad Internacional Menéndez Pelayo.
- Filipeck, S. P., Keith, W. E., & Giese, J. (1987). The status of the instream flow issue in Arkansas. *Proc. Ark. Acad. Sci;* (41), 43-48.
- França-Costa, W., Miranda, L., Cabral-Borges, R., Saraiva, A., Imperatriz-Fonseca, V., & Giannini, T. (2018). The Need of Species Distribution Models Metadata: Using Species Distribution Model to Address Decision Making on Climate Change. *Biodiversity Information Science and Standards.* 2, doi: 10.3897/biss.2.25478.
- Franklin, P., Dunbar, M., & Whitehead, P. (2008). Flow controls on lowland river macrophytes: a review. *Sci. Total Environ.* 400, 369-378.
- Galat, D. L., & Lipkin, R. (2000). Restoring ecological integrity of great rivers: historical hydrographs aid in defining reference conditions for the Missouri river. *Hydrobiology;* (422/423), 29-48.
- Gao, Y., Mas, J.-F., Quevedo, A., Paneque-Gálvez, J., & Skutsch, M. (2018). Assessing forest cover change in Mexico from annual MODIS VCF data (2000–2010). *Int. Journ. of Remote. Sens.,* <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1479789>.
- Garrido, A., Cuevas, M. L., Cotler, H., González, D. I., & Tharme, R. (2010). *Evaluación del grado de alteración ecohidrológica de los ríos y corrientes superficiales de México.* México: SEMARNAT.
- Gath, I., & Geva, A. (1989). *Unsupervised optimal fuzzy clustering.* IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. (7).
- Geer, W. H. (1980). *Evaluation of five instream flow needs methodologies and water quantity needs of three Utah trout streams.* U.S. Fish and Wildlife Service and Utah Division of Wildlife Resources.

- Gleeson, T., & Richter, B. (2018). How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? *River Res. Applic.* 84, 83-92.
- González Villela, R., & Banderas Tarabay, A. G. (2011). *Métodologías para el cálculo de caudales ambientales y la conservación del hábitat en los ríos regulados por presas*. México: CNA-IMTA.
- Graham, C., & Harrod, C. (2009). Implications of climate change for the fishes of the British Isles. *J. Fish. Biol.* 74, 1143-1205.
- Gustafson, D., & Kessel, W. (1979). *Fuzzy clustering with fuzzy covariance matrix*. IEEE CDC, San Diego.
- Gustard, A., Cole, G., Marshall, D., & Bayliss, A. (1987). *A study compesation flows in the UK*. Institute of Hydrology, Wallingford.
- Hanski, J., Rosqvist, T., & Crawford-Brown, D. (2018). Assessing climate change adaptation strategies - the case of drought and heat wave in the French nuclear sector. *Reg. Environ. Change.* 18(6), 1801-1813.
- Harrison, P., Berry, P., Henriques, C., & Holman, I. (2008). Impacts of socio-economic and climate change scenarios on wetlands: linking water resources and biodiversity metamodels. *Climate Change.* 90, 113-139.
- Hastie, T., Tibshinari, R., & Friedman, J. (2008). *Elements os statistical learning*. Springer.
- Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines*. New Yersey, USA: Pearson Prentice Hall.
- Hendriks, D. D., Kuijper, M. M., & van Ek, R. (2014). Ground water impact on environmental needs of stream in sandy catchmentes in the Netherlands. *Hydrological Sciences Journal;* 59(3-4), 562-577.
- Hidore, J., Oliver, J., Snow, M., & Snow, R. (2010). *Climatology: an atmospheric science*. Pearson Prentice Hall.
- Hoppe, R. A. (1975). *Minimum streamflows for fish*. Montana State University, Soil-Hydrology Wrokshop, USFS, Montana.
- Hoppner, F., Klawonn, F., Kruse, R., & Runkler, T. (1999). *Fuzzy cluster analysis*. Chichester: Wiley.
- Horne, A., Kaur, S., Szemis, J., Costa, A., Webb, J., & Nathan, R. (2017). Using optimization to develop a "designer" environmental flow regime. *Env. Model. Soft.* 88, 188-199.
- <http://www.uncsd2010.org>. (2010). *United Nations Conference on Sustainable Development*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2015, de <http://www.uncsd2010.org>
- Hughes, D., Desai, A., Birkhead, A., & Louw, D. (2014). A new approach to rapid, desktop-level, environmental flow assessments for rivers in South Africa. *Hydrol. Sci. J.* 59(3), 1-15.
- Hutchinson, M. (2008). ANUSPLIN Versión 4.3. <http://fennerschool.anu.edu.au/publications/software/anusplin.php>.
- INEGI. (2016, Octubre 08). *Hidrografía*. Retrieved from Red hídrica de México: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/hidrografia/>
- Instream Flow Council. (2002). *Instream Flows for Riverine Resource Stewardship*. Instream Flow Council, USA.
- Intergovernmental Panel on CLimate Change (IPCC). (2001). *Third assessment report - Climate Change*.
- IPCC;. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*.
- Irvine, D., Kurylyk, B., Cartwright, I., Bonham, M., Post, V., Banks, E., & Simmons, C. (2017). Groundwater flow estimation using temperature-depth profiles in a complex environment and a changing climate. *Science of the Total Environment.* 574, 272-281.
- Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *Applied geostatistics*. Nueva York: Oxford University Press.
- ITE. (n.d.). *Instituto de tecnologías educativas del gobierno de España*. Retrieved 03 23, 2017, from https://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion05/1_el_fenmeno_de_la_oscilacin_del_surel_nioenso.html
- IUCN. (2017, 08 28). *Red List*. Retrieved from <https://newredlist.iucnredlist.org/>
- Jackson, S., Douglas, M., Kennard, M., Pusey, B., Huddleston, J., Harney, B., & et al. (2014). We like to listen to stories about fish: integrating indigenous ecological and scientific knowledge to inform environmental flow assessment. *Ecol. Soc.* 19(1), 43.
- Jacobson, R. B., & Galat, D. L. (2006). Flow and form in rehabilitation of large-river ecosystems: an example from the Lower Missouri river. *Geomorfology;* (77), 249-269.
- Johnson, A., Acreman, M., Dunbar, M., Fesit, S., Giacomello, A., Gozlan, R., & et al. (2009). The British river of the future: how climate change and human activity might affect two contrasting river ecosystems in England. *Sci. Tot Environ.* 407, 4787-4798.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. (1990). *Finding groups in data: an Introdduction to cluster analysis*. John Wiley and Sons.
- Kelemen, Z., Gillikin, P., & Bouillon, S. (2018). Relationship between river water chemistry and shell chemistry of two tropical African freshwater bivalve species. *Chemical Geology*, doi:10.1016/j.chemgeo.2018.04.026.
- Kendall, M. (1975). *Rank correlation methods*. London, U.K.: Charles Griffin and Co. Ltd.
- Kendy, E., Apse, C., & Blann, K. (2012). *A practical guide to environmental flows for policy and planning, with nine case studies from the United States*. The Nature Conservancy.

- Kennard, M., Olden, J., Arthington, A., Pusey, B., & Poff, N. (2007). Multiscale effects on flow regime and habitat and their interaction on fish assemblage structure in eastern Australia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 64, 1346-1359.
- Kennen, J. G., Henriksen, J. A., & Nieswand, S. P. (2007). *Development of hydroecological integrity assessment process for determining environmental flows for New Jersey streams*. U.S. Geological Survey, New Jersey Water Science Center.
- Kennen, J. G., Riskin, M. L., & Charles, E. G. (2014). Effects of stream-flow reductions on aquatic macroinvertebrates: linking groundwater withdrawals and assemble response in southern New Jersey streams, USA. *Hydrological Sciences Journal*; 59 (3-4), 545-561.
- Kernan, M., Battarbee, R. W., & Moss, B. R. (2010). *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*. Chichester: Wiley.
- Khanal, U., Wilson, C., Lee, B., & Hoang, V.-N. (2018). Climate change adaptation strategies and food productivity in Nepal: a counterfactual analysis. *Clim. Change*. 148(4), 575-590.
- Kim, P. (2017). *Matlab deep learning*. Seoul, Corea: Apress.
- King, J. M., & Brown, C. A. (2010). Integrated basin flow assessments: concepts and method development in Africa and South-east Asia. *Freshwater Biology*; 55 (1), 127-146.
- King, J. M., Beuster, H., Brown, C., & Joubert, A. (2014). Pro-active management: the role of environmental flows in transboundary cooperative planning for the Okavango river system. *Hydrological Sciences Journal*; 59(3-4), 786-800.
- King, J. M., Brown, C., & Sabet, H. (2003). A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River research and applications*; (19), 619-639.
- King, J., Tharme, R., & De Villeers, M. (2000). *Manual for the Building Block Methodology*. Freshwater Research Unit, University of Cape Town, South Africa.
- Koleff, P., & Soberón, J. (2008). *Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies. Capital natural de México. Vol. I: conocimiento actual de la biodiversidad*. México: CONABIO.
- Korsgaard, L. (2006). *Environmental flows in integrated water resources management: linking flows, services and values*. Dinamarca: Tesis doctoral, Technical University of Denmark.
- Kreyling, J., Arfin-Khan, M., Sultana, F., Babel, W., Bierkuhnlein, C., Foken, T., . . . Jentsch, A. (2016). Drought effects in climate change manipulation experiments: quantifying the influence of ambient weather conditions and rain-out shelter artifacts. *Ecosystems*, DOI: 10.1007/s10021-016-0025-8.
- Kuczynski, L., Legendre, P., & Grenouillet, G. (2017). Concomitant impacts of climate change, fragmentation and non-native species led to reorganization of fish communities since the 1980's. *Global Ecology and Biogeography*, 1-10.
- Kumar, P., Masago, Y., Kumar-Mishra, B., & Fukushi, K. (2018). Evaluating future stress due to combined effect of climate change and rapid urbanization for Pasig-Marikina River, Manila. *Groundwater for Sustainable Development*. 6, 227-234.
- Kundzewicz, Z., Mata, L., Arnell, N., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., & et al. (2007). Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. In M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. Van Der Linden, & C. Hanson, *Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (pp. 173-210). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Laizé, C. L., Acreman, M. C., Schneider, C., Dunbar, M. J., Houghton-Carr, H. A., Flörke, M., & Hannah, D. M. (2013). Projected flow alteration and ecological risk for pan-European rivers. *River research and applications*; (30), 299-314.
- Lamouroux, N., Gore, J., Lepori, F., & Statzner, B. (2015). The ecological restoration of large rivers needs science-based, predictive tools meeting public expectations: overview of the Rhône project. *Freshwater Biology*. 60, 1069-1084.
- Lamouroux, N., Hauer, C., Stewardson, M., & Poff, N. (2017). Physical habitat modelling and ecohydrological tools. In *Water for the environment* (pp. 265-286). Chichester, UK: Elsevier.
- Lang, B., Ehnes, R., Brose, U., & Rall, B. (2017). Temperature and consumer type dependancies of energy in natural communities.
- Laurent, A., Fennel, K., Ko, D., & Lehrter, J. (2018). Climate Change Projected to Exacerbate Impacts of Coastal Eutrophication in the Northern Gulf of Mexico. *Journal of Geophy. Res: Oceans*. 123(5), 3408-3426.
- Lawrence, J. E., Pavia, C. P., Kaing, S., Bischel, H. N., Luthy, R. G., & Resh, V. H. (2014). Recycled water for augmenting urban streams in mediterranean-climate regions: a potencial approach for riparian ecosystem enhancement. *Hydrological Sciences Journal*; 59(3-4), 488-501.
- Le Cornu, E., Doerr, A., Finkbeiner, E., Gourlie, D., & Crowder, L. (2018). Spatial management in small-scale fisheries: A potential approach for climate change adaptation in Pacific Islands. *Marine Policy*. (88), 350-358.

- Le Quesne, T., Kendy, E., & Weston, D. (2010). *The implementation challenge: taking stock of government policies to protect and restore environmental flows*. Retrieved Septiembre 24, 2015, from <http://conserveonline.org/work-spaces/eloha/documents/wwf-tnc-e-flow-policies-report>
- Leblois, E. (2012). *Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches*. Université de Grenoble, Collège doctoral IMEP.
- Leblois, E., & Creutin, J.-D. (2013). Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field: Adaptation of the turning band method. *Water resources research*, 49(6), 3375-3387.
- Lejeune, Q., Davin, E., Gudmundsson, L., Winckler, J., & Seneviratne, S. (2018). Historical deforestation locally increased the intensity of hot days in northern mid-latitudes. *Nature Climate Change*, 8, 386-390.
- Lepioufle, J. (2009). Modélisation spatio-temporelle d'un champ de pluie: application aux pluies journalières du bassin versant de la Loire. *Doctoral thesis. Grenoble. INPG*.
- Lepioufle, J., Leblois, E., & Creutin, J. (2012). Variography of rainfall accumulation in presence of advection. *Journal of Hydrology*, 464-465, 494-504.
- Lichtenstern, A. (2013). *Kriging methods in spatial statistics*. München: Technische Universität München.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general*. España: Universidad del País Vasco.
- Llorente-Bousquets, J., & Ocegueda, S. (2008). *Estado del conocimiento de la biota. Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. México: CONABIO.
- Lokgariwar, C., Chopra, V., Smakhtin, V., Bharati, L., & o'Keeffe, J. (2014). Including cultural water requirements in environmental flow assessment: an example from the upper Ganga River, India. *Water Int*, 39, 81-96.
- Mackay, S., Arthington, A., & James, C. (2014). Classification and comparisson of natural and altered flow regimes to support an Australian trial of the Ecological Limits of Hydrological Alteration framework. *Ecohydrology*, 7, 1485-1507.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, 1 (pp. 281-297). Berkeley: University of California Press.
- Maddock, I. (1999). The importance of physical habitat assessment to evaluating river health. *Freshwater Biology*, (46), 807-819.
- Magaña, V., Pérez, J., Conde, C., Gay, C., & Medina, S. (1997). *El fenómeno de El niño y la oscilación sur (ENOS) y sus impactos en México*. Departamento de Meteorología General. Centro de Ciencias de la Atmósfera. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maheu, A., Poff, N., & St-Hilaire, A. (2016). A classification of stream water temperature regimes in the conterminous United States. *River Res. Appl.*, 32, 896-906.
- Mandelbrot, B. (1975). *Les objets fractals: Forme, hasard, et dimension*. Paris: Flammarion.
- Mandelbrot, B. (1977). *Fractals: Forme, chance and dimension*. San Francisco: Freeman.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. New York: Freeman.
- Mantoglou, A., & Wilson, J. (1982). The Turning Bands Method for simulation of random fields using line generation by a spectral method. *Water Resources Research*, 18(5), 1379-1394.
- Martínez Santa-María, C., & Fernández Yuste, J. A. (2006). *Índices de alteración hidrológica (IAHRIS 2.2)*. España: Financiado por la Dirección General del Agua del Ministerio del Medio Ambiente de España mediante convenio con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, (58), 1246-1266.
- Matheron, G. (1973). The intrinsic random functions and their applications. *Advances in Applied Probability*, 5(3), 439-468.
- Mathews, R., & Richter, B. (2007). Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmeantal flow-setting. *Journal of the American Water Resources Association*, (43), 1-14.
- McCarthy, M. (2007). *Bayesian Methods for Ecology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- McClain, M., Sabalusky, A., Anderson, E., Dessu, S., Melsse, A., Ndomba, P., & et al. (2014). Comparing flow regime, channel; hydraulics and biological communities to infer flow-ecology relationships in the Mara River of Kenya and Tanzania. *Hydrol. Sci. J.*, 59, 801-819.
- Merz, R., & Blöschl, G. (2005). Flood frequency regionalization - Spatial proximity vs. catchment attributes. *J. Hydrol.*, (302), 283-306.
- Milhouse, R. T., Updike, M. A., & Schneider, D. M. (1989). *Physical habitat simulation system reference manual. Version II*. U.S. Fish and Wild Service, Department of interior Research and Development, Washington D.C.
- Millenium Ecosystem. (2005). *Ecosystems and Human Wellbeing*. Washington D.C.: Island Press.
- Milner, A., Brown, L., & Hannah, D. (2009). Hydroecological response of river systems to shrinking glaciers. *Hydrol Process*, 23, 62-77.

- Mohamoud, Y. (2008). Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves. *Hydrol. Sci. Journal*. 53, 706-724.
- Monterroso-Rivas, A., Conde-Álvarez, A., Pérez-Damian, J., López-Blanco, J., Gaytan-Diman, M., & Gómez-Díaz, J. (2018). Multi-temporal assessment of vulnerability to climate change: insights from the agricultural sector in Mexico. *Clim. Change*, doi:10.1007/s10584-018-2157-7.
- Moog, O., & Chovanec, A. (2000). Assessing the ecological integrity of rivers: walking the line among ecological, political and administrative interests. *Hydrobiology*; (422/423), 99-109.
- Mooji, W., Hulsmann, S., Domis, L., Nolet, B., Bodelier, P., Boers, C., & et al. (2005). The impact of climate change on lakes in The Netherlands: a review. *Aquat. Ecol.* 39, 381-400.
- Moore, H. (2007). *MATLAB para ingenieros* (7a. ed.). México: Pearson Education.
- Moore, H. (2007). *MATLAB para ingenieros* (7° Ed. ed.). México: Person Education.
- Moss, B. R. (2010). *Ecology of freshwater*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Muhar, S., Schwarz, M., Schmutz, S., & Jungwirth, M. (2000). Identification of rivers with high and good habitat quality: methodological approach and applications in Austria. *Hydrobiology*; (422/423), 343-358.
- Muñoz-Marín, C. (2008). *Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Murray-Tortarolo, G., Jaramillo, V., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricul. and Forst. Meteo.* 253-254, 124-131.
- Naiman, R., Bunn, S., Nilsson, C., Petts, G., Pinay, G., & Thompson, L. (2002). Legitimizing fluvial ecosystems as users of water: an overview. *Environmental Managment.* 30 (4), pp. 455-467.
- Nilsson, C., & Svedmark, M. (2002). Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. *Environmeantl management*; (30), 468-480.
- Norris, R. H., & Thoms, M. C. (1999). What is river health? *Freshwater Biology*; (41), 197-209.
- Northern Great Plains Resource Program. (1974). *Instream needs sub-group report*. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington D.C.
- O'Brien, G., Dickens, C., Hines, E., Wepener, V., Stassen, R., Quayle, L., . . . Landis, W. (2018). A regional-scale ecological risk framework for environmental flow evaluations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 957-975.
- Olden, J. D., & Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indeces for characterizing stream-flow regimes. *River Research and Applications*; (19), 101-121.
- Olden, J., Konrad, C., Melis, T., Kennard, M., Freeman, M., Mims, M., & et al. (2014). Are large-scale flow experiments informing the science and management of reshwater ecosystems? *Front. Ecol. Environ.* 12, 176-185.
- Orr, H., Wilby, R., McKenzie-Hadger, M., & Brown, I. (2008). Limiting and adapting to climate change in the uplands: a UK perspective on ecosystem services. *Clim Res.* 37, 77-98.
- Ortega-Díaz, A., & Casamadrid-Gutiérrez, E. (2018). Competing actors in the climate change arena in Mexico: A network analysis. *Jour. of Environ. Manag.* 215, 239-247.
- Ouarda, T. (2013). *Hydrological Frequency Analysis, Regional Encyclopedia of Envriionmetrics*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Ouarda, T. (2016). Regional FLOOD Frequency Modeling. Chanpert 77. In P. S. V, *Handobook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Ouarda, T., Bâ, K., Diaz-Delgado, C., Cârsteanu, A., Chokmani, K., Gingras, H., . . . Bobée, B. (2008). Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. *Journal of Hydrology.* (348), 40-58.
- Parades-Tavares, J., Gómez-Albores, M., Mastachi-Loza, C., Díaz-Delgado, C., Becerril-Piña, R., Martínez-Valdés, H., & Bâ, K. (2018). Impacts of Climate Change on the Irrigation Districts of the Rio Bravo Basin. *Water.* 10(3), 258.
- Pasternack, G. B., Wang, C. L., & Merz, J. E. (2004). Application of a 2D hydrodynamic model to design of reach-scale gravel replenishment on the Mokelumne river, California. *River Research and Applications*; (20), 205-225.
- Pearl, J. (2000). *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Pebesma, E. J. (2013). Spatio-temporal geostatistics using gstat. Intitute of Geoinformatics, University of Münster.
- Pineda-Martínez, L., & Carbajal, N. (2017). Climatic analysis linked to land vegetation cover of Mexico by applying multivariate statistical and clustering analysis. *Atmósfera* 30(3), 233-242.
- Piniewski, M., Laizé, C. L., Acreman, M. C., Okruzko, T., & Schneider, C. (2011). Effect of climate change on environmental flow indicators in the Narew Basin, Poland. *Journal of Environmeantl Quality*; 43(1), 155-167.

- Piniewski, M., Okruszko, T., & Acreman, M. C. (2014). Environmental water quantity projections under market-driven and sustainability-driven future scenarios in the Narew basin, Poland. *Hydrological Sciences Journal*; 59 (3-4), 916-934.
- PNDU. (2016, January). *Sustainable Development Goals*. Retrieved marzo 06, 2017, from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- Poff, N. L., & Zimmerman, J. K. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*; (55), 194-205.
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., . . . Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 147-170.
- Poff, N., & Matthews, J. (2013). Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future progress. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5, 667-675.
- Poff, N., Allan, J., Bain, M., Karr, J., Prestegard, K., Richter, B., . . . Stromberg, J. (1997). The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*; (47), 769-784.
- Poff, N., Tharme, R., & Arthington, A. (2017). Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies. En *Water for the environment* (págs. 203-236). England: Elsevier.
- Poiani, A. (2006). Effects of floods on distribution and reproduction of aquatic birds. *Adv. Ecol. Res.* 39, 63-83.
- Polhemus, N. (2006). *Análisis de conglomerados*. Manual de usuarios: Statgraphics.
- Poorter, H., & Pérez-Soba, M. (2002). Plant growth at elevated CO₂. In H. Mooney, & J. Canadell, *Enciclopedia of global change. Vol. 2, The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change*. (pp. 489-496). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Postel, S., & Richter, B. (2003). *Rivers for life. Managing water for people and nature*. Washington D.C.: Island Press.
- Prewitt, C., & Carlson, C. (1980). *Evaluation of four instream methodologies used in the Yampa and White rivers, Colorado*. Bureau of Land Management, Biological Sciences Series Number Two, Denver, CO.
- Rabeni, C., & Jacobson, R. (1993). The importance of fluvial hydraulics for fish-habitat restoration in low-gradient alluvial streams. *Freshwater Biology*; (29), 211-220.
- Ramos, M., Leblois, E., & Creutin, J.-D. (2006). From point to areal rainfall: linking the different approaches for the frequency characterisation of rainfalls in urban areas. *Water Science and Technology*. 54(6-7), 33-40.
- Reiser, D. W., Wesche, T. A., & Estes, C. (1989). Status of instream flow legislation and practice in North America. *Fisheries*; 14(2), 22-29.
- Requena, A., Flores, I., Mediero, L., & Garrote, L. (2016). Extension of observed flood series by combining a distributed hydro-meteorological model and a copula-based model. *Stochastic Environ. Research and Risk Assess.* 30(5), 1363-1378.
- Requena, A., Ouada, T., & Chebana, F. (2017). Flood frequency analysis at ungauged sites based on regionally estimated streamflows. *Journal of hydrometeorology*, doi: 10.1175/JHM-D-16-0143.1.
- Richards, J., Mokrech, M., Berry, P., & Nicholls, R. (2008). Regional assessment of climate change impacts on coastal and fluvial ecosystems and the scope for adaptation. *Clim Change*. 90, 141-67.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braund, P., & Powell, J. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*. (37), 231-249.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braund, P., & Powell, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*. 14, 329-340.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1995). A method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conserv. Biol.* 10 (4), 1163-1174.
- Richter, B. D., Warner, A. T., Meñyer, J. L., & Lutz, K. (2006). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Research and Applications*; (22), 297-318.
- Richter, B., & Thomas, G. (2007). Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecol. Soc.* 12.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*; (20), 53-65.
- Rousselle, J., Watt, W. E., Latham, K. W., Neil, C. R., & Richards, T. L. (1990). *Hydrologie des crues au Canada : Guide de planification et de conception*. Conseil National de Recherches Canada, Ottawa.
- Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G., Crookston, N., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. (2009). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate change impacts on the vegetation. *Clim. Change*. 102, 595-623.
- Salmerón-García, O., Zavala-Hidalgo, J., Mateos-Jasso, A., & Romero-Centeno, R. (2011). Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability. *Ocean Dynamics*. 61, 439-448.

- San-José, R., Pérez, J., Pérez, L., & González-Barras, R. (2018). Effects of climate change on the health of citizens modelling urban weather and air pollution. *Energy*. 165, 53-62.
- Scott, C., & Banister, J. (2008). The dilemma of water management 'Regionalization' in Mexico under centralized resource allocation. *Water Res. Develop.* 24(1), 61-74.
- SEMARNAT/CONAGUA. (2016). *Estadísticas del agua en México edición 2016*. México: SEMARNAT/CONAGUA.
- Sen, P. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the Amer. Stat. Assoc.* 63(324), 1379-1389.
- Shenton, W., Hart, B., & Chan, T. (2011). Bayesian network models for environmental flow decision-making: 1. Latrobe River Australia. *River Res. Appl.* 27, 283-296.
- Shenton, W., Hart, B., & Chan, T. (2013). A Bayesian network approach to support environmental flow restoration decisions in the Yarra River, Australia. *Stoch. Environ. Risk Assess.* 28, 57-65.
- Shu, C., & Ouarda, T. (2012). Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Hydrology*. 349, 31-43.
- Skøien, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2006). Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Services*. (10), 277-287.
- Sluiter, R. (2009). *Interpolation methods for climate data. Literature review*. Países Bajos: Informe presentado a KNMI, R&D Information and Observation Technology, De Bilt.
- Smakhtin, V. U., & Eriyagama, N. (2008). Developing a software package for global desktop assessment of environmental flows. *Environmental Modelling & Software*, 1396-1406.
- Smith, T., & Smith, R. (2007). *Ecología*. Madrid: Pearson Education.
- Speed, R., Binney, J., Pusey, B., & Catford, J. (2011). Policy measures, mechanisms, and framework for addressing environmental flows. *ACEDP Project Report*. Brisbane, QLD: International Water Centre.
- Ssegane, H., Amatya, D., Tollner, E., Dai, Z., & Nettles, J. (2013). Estimation of daily streamflow of southeastern coastal plain watersheds by combining estimated magnitude and sequence. *Journal of the American Water Resources Association*. 49, 1150-1166.
- Stalnaker, C., & Arnette, S. (1976). *Methodologies for the determination of stream resource flow requirements: An assessment*. US Fish and Wildlife Services, Office of Biological Services Western Water Association.
- Stedinger, J., Vogel, R., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. In *Handbook of hydrology*, edited by D. Maidment (pp. 18.1-18.66). New York: McGraw-Hill.
- Stewardson, M., & Webb, J. (2010). *Modelling ecological responses to flow alteration: making the most of existing data and knowledge*. Melbourne, Australia: CSIRO.
- St-Hilaire, A., Daigle, A., Beveridge, D., Caissie, D., & Benyahya, L. (2009). *Analyse multivariée des indices d'altération hydrologique de l'est du Canada*. Québec, Canada: Rapport de recherche R1058.
- Streetly, M. J., Bradley, D. C., Streetly, H. R., Young, C., Cadman, D., & Banham, A. (2014). Bringing groundwater models to LIFE: a new way to assess water resource management options. *Hydrological Sciences Journal*; 59 (3-4), 578-593.
- Tackeray, S., Jones, I., & Maberly, S. (2008). Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: species-specific response to nutrient enrichment and climate change. *Journal of Ecology*. 96, 523-535.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2012). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Telléz-Valdés, O., Dávila-Aranda, P., & Lira-Saade, R. (2006). The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in Eastern Mexico. *Biodivers. Conserv.* 15, 1095-1107.
- Tennant, D. (1976). Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*; 1(4), 6-10.
- Tharme. (1996). *Review of international methodologies for the quantification of the instream flow requirements of rivers*. Freshwater Research Unit, University of Cape Town, Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, South Africa.
- Tharme. (2003). A global perspective of environmental flow assessment: emerging trends and the development and application of the environmental flow methodologies for rivers. *River research and applications*; (19), 397-441.
- Tharme, R. E., & King, J. M. (1998). *Development of Building Block Methodology for instream flow assessments, and supporting research on the effects of different magnitude flows on riverine ecosystems*.
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III. *Neder. Akad. Wetensch.* (53), 386-392.

- Theodoropoulos, C., Skoulikidis, N., Rutschmann, P., & Stamou, A. (2018). Ecosystem-based environmental flow assessment in a Greek regulated river with the use of 2D hydrodynamic habitat modelling. *River Res. Applic.*, 1-10.
- Therneau, T., & Clinic, M. (2018, Octubre 8). *Deming, Theil-Sen, and Passing-Bablok Regression*. Retrieved from <https://cran.revolutionanalytics.com/web/packages/deming/vignettes/deming.pdf>
- Thompson, J., Laizé, C., Green, A., Acreman, M., & Kingston, D. (2014). Climate change uncertainty in environmental flows for the Mekong River. *Hydrol. Sci. J.* 59(3-4), 935-954.
- Timpane-Padgham, B., Beechie, T., & Klinger, T. (2017). A systematic review of ecological attributes that confer resilience to climate change in environmental restoration. *PLOS One*, 1-23.
- Tonkin, J., Merritt, D., Olden, J., Reynolds, L., & Lytle, D. (2017). Flow regime alteration degrades ecological networks in riparian ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0379-0>.
- Toride, K., Cawthorne, D., Ishida, K., Kavvas, M., & Anderson, M. (2018). Long-term trend analysis on total and extreme precipitation over Shasta Dam watershed. *Sci. Tot. Environ.* 626, 244-254.
- Tveito, O. (2007). The Developments in Spatialization of Meteorological and Climatological Elements. In H. Dobesh, P. Dumolard, & I. Dyras, *Spatial Interpolation for Climate Data: the use of GIS in Climatology and Meteorology*. Reino Unido: ISTE.
- Tyler Miller, G., & Spoolman, S. (2015). *Living in the environment*. Cengage Learning / National Geographic.
- USAID. (2016). *Environmental flows in Rufiji River Basin assessed from perspective of planned development in Kilombero and Lower Rufiji sub-basins. Technical assistance to support the development of irrigation and rural roads infrastructure project (IRRIP2)*. United States Agency for International Development. Final report.
- V3, D. (2017, septiembre 30). *Daymet*. Retrieved from <https://daymet.ornl.gov/>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., . . . Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*. 467, 55-561.
- Wackernagel, H. (2003). *Multivariate geostatistics: An introduction with applications*. Berlín, Heidelberg: Springer.
- Warner, A., Bach, L., & Hickey, J. (2014). Restoring environmental flows through adaptive reservoir management: planning, science, and implementation through the sustainable rivers project. *Hydrol. Sci. J.* 59, 770-785.
- Webb, J., Arthington, A., & Olden, J. (2017). Models of ecological responses to flow regime change to inform environmental flows assessment. In *Water for the Environment* (pp. 284-316). UK: Elsevier.
- Webb, J., Arthington, A., & Olden, J. (2017). Models of ecological responses to flow regime change to inform environmental flows assessments. In *Water for the environment* (pp. 287-316). England: Elsevier.
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Whitehead, P., Wade, A., & Butterfield, D. (2009a). Potential impacts of climate change on water quality and ecology in six UK rivers. *Hydrol Res.* 40, 113-22.
- Whitehead, P., Wilby, R., Battarbee, R., Kernan, M., & Wade, A. (2009b). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrol Sci.* 54, 101-123.
- Wilby, R. L., Orr, H., Watts, G., Battarbee, R. W., Berry, P. M., Chadd, R., . . . Wood, P. J. (2010). Evidence needed to manage freshwater ecosystems in a changing climate: turning adaptation principles into practice. *Science of the total environment*; (408), 4150-4164.
- Wohl, E., Bledsoe, B., Jacobson, R., Poff, N., Rathburn, S., Walters, D., & et al. (2015). The natural sediment regime in rivers: broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*. 65, 358-371.
- Yarnell, S., Petts, G., Schmidt, J., Whipple, A., Beller, E., & Dahm, C. (2015). Functional flows in modified riverscapes: hydrographs, habitats and opportunities. *BioScience* 65, 963-972.
- Zeilew, M., & Alfredsen, K. (2014). Transferability of hydrological model parameter spaces on the estimation of runoff in ungauged catchments. *Hydrological Sci. Journal.* 59, 1470-1490.
- Zhang, Y., Vaze, J., Chiew, F., & Li, M. (2015). Comparing flow duration curve and rainfall-runoff modelling for predicting daily runoff in ungauged catchments. *Journal of hydrology*, 72-86.
- Zhang, Y., Vaze, J., Chiew, F., Teng, J., & Li, M. (2014). Predicting hydrological signatures in ungauged catchments using spatial interpolation, index model, and rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology.* 517, 936-948.

